

「地熱発電技術研究開発」

事業原簿【公開】 (平成 30 年)

担当部	国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 新エネルギー部
-----	--------------------------------------

—目次—

概要	概要-1
プロジェクト用語集	概要-10

I.事業の位置付け・必要性について

1. NEDO の関与の必要性・制度への適合性	I-1
1.1 NEDO が関与することの意義	I-1
1.2 実施の効果	I-1
2. 事業の背景・目的・位置づけ	I-3
2.1 事業の背景	I-3
2.2 事業の目的・位置づけ	I-4

II.研究開発マネジメントについて

1. 事業の目標	II-1
2. 事業の計画内容	II-2
2.1 研究開発の内容	II-2
2.2 研究開発の実施体制	II-4
2.3 研究開発の運営管理	II-7
2.4 研究開発成果の実用化・事業化に向けたマネジメントの妥当性	II-8
3. 情勢変化への対応	II-8
4. 評価に関する事項	II-8

III.研究開発成果について

1. 事業全体の成果	III-1
------------	-------

IV.実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて

1. 事業全体の実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて	IV-1
-----------------------------------	------

(添付資料)

添付資料 1 個別テーマについて(全 20 テーマ)

添付資料 2 プロジェクト基本計画

概要

		最終更新日	平成 30 年 9 月 18 日
プログラム名	エネルギーイノベーションプログラム		
プロジェクト名	地熱発電技術研究開発	プロジェクト番号	P13009
担当推進部/担当者	新エネルギー部/ 主任研究員 加藤 久遠(平成 29 年 4 月～現在) 主任 丸内 亮 (平成 28 年 5 月～現在) 主査 田中 俊彦 (平成 29 年 4 月～現在) 主査 讃岐 育孝 (平成 29 年 10 月～現在)		
0. 事業の概要	(1) 概要:地熱資源の有効活用のための、環境配慮型高機能地熱発電システムに係る機器開発、現状未利用である低温域でのバイナリー発電システム開発、環境保全対策や環境アセスメント円滑化に資する技術開発等により、我が国の地熱発電の導入拡大を促進する。(委託及び共同研究(NEDO 負担率 2/3)) (2) 事業期間:平成 25 年度～32 年度(8 年間)		
I. 事業の位置付け・必要性について	(1) 政策上の位置づけ 2011年の東日本大震災以降、再生可能エネルギーの導入拡大が望まれる中、我が国は世界第3位の地熱資源ポテンシャルを有すると推定されており、地熱発電に大きな期待が掛かっている。2012年には、再生可能エネルギーの固定価格買取制度が施行され、地熱では、15MW未満では40円/kWh、15MW以上では26円/kWhという買取り価格が設定され、地熱開発事業者にとって、一定の採算性が確保されるに至った。2014年には、「エネルギー基本計画」が閣議決定され、地熱発電の2030年度における導入見込量として最大で約155万kW(2015年度実績 52万kW)、発電電力量113億kWh(2015年度実績 26億kWh)が掲げられ、地熱発電のさらなる導入拡大が期待されている。 一方、「独立行政法人の事務・事業の見直しの基本方針」(2012年、閣議決定)を受け、NEDOがこれまで実施してきた地熱開発関連事業のうち、地熱資源調査や地熱資源探査技術開発の業務は、石油天然ガス金属鉱物資源機構(JOGMEC)へ移管されることとなった。 (2) NEDOが関与する意義 NEDOは、1980年設立当初より、地熱事業に携わっており、地熱資源の調査として、「地熱開発促進調査」を実施した。これは、全国の地熱資源が賦存されると推定される地域を対象として、約70地域で実施された(1980～2010年)。こうした当時のNEDO事業の成果が多くの事業者に利用され、新規地熱発電所の立地に大いに貢献している。 また、上記の地熱資源調査の他、技術開発事業においても、「地熱探査技術等検証調査」や「熱水利用発電プラント等開発」が実施された(1980～2003年)。これより、地熱探査技術、地熱井掘削技術、貯留層評価・貯留層管理技術、EGS技術、地上設備・発電システム技術等の研究開発により、地熱開発の導入・促進に貢献した。 2012年の独法見直しにより、NEDO業務の多くがJOGMECへ移管されて以降、NEDOは、技術開発事業のうち、地熱発電利用技術、環境保全対策技術、次世代地熱発電技術(超臨界地熱発電技術)等を担当している。 こうした中、2015年より、「地熱発電の推進に関する研究会」(資源エネルギー庁)が開催され、エネルギー基本計画の2030年目標達成のための3つの柱(①新規開発地点の開拓、②事業環境の整備、③地域理解の促進)が提示された。このうち、「②事業環境の整備」の中に技術開発事業が含まれており、NEDOが果たすべき役割は大きく、その成果が期待されている。 (3) 実施の効果 2030年頃に、最大で約155万kWの発電容量、及び110億kWhの発電量の達成が見込まれる。これによるCO2排出削減量は、約620万トン-CO2/年である。 また、これまでのバイナリー発電システム開発やIoT-AI技術等を適用した運転管理の高度利用化技術の成果等により、多くの温泉地等で中小規模地熱発電や熱利用が普及し、地域経済の活性化も見込まれる。これは、大規模地熱開発へも、地域との合意形成等に役立つ資料を提供し、その導入・拡大に資する。		
II. 研究開発マネジメントについて			
事業の目標	最終目標(平成29年度) ポテンシャルの高い地域への地熱発電の導入拡大を目的とし、既存の発電設備よりも、小型化・高効率化の地熱発電システムの機器開発及び低温域の地熱資源を活用したバイナリー発電システムを開発すると共に、環境保全対策や環境アセスメント円滑化に資する取り組みを行う。なお、公募により研究開発実施者を選定後、目標の具体化等を行うこととする。 (1) 環境配慮型高機能地熱発電システムの機器開発 地熱発電システムの高効率化に資する技術(熱効率を 20%以上に向上させる技術等)を確立する。		

	<p>(2) 低温域の地熱資源有効活用のための小型バイナリー発電システムの開発 未利用の温泉熱を利用した低温域のバイナリー発電について、熱効率7%以上に資するシステムを確立するとともに、スケール対策、腐食対策、二次媒体の高性能化に係る技術を確立する。</p> <p>(3) 発電所の環境保全対策技術等開発 ガス漏洩防止技術や拡散シミュレーション技術、発電所の高度利用に向けた技術（発電能力や利用率の回復・維持・向上のための技術、付加価値増大を実現する技術）等を確立する。</p>										
事業の計画内容	主な実施事項	H 25fy	H 26fy	H 27fy	H 28fy	H 29fy	H 30fy	H 31fy	H 32fy		
	(1) 環境配慮型高機能地熱発電システムの機器開発	発電システムの高効率化									
	(2) 低温域の地熱資源有効活用のための小型バイナリー発電システムの開発	バイナリー発電システム			スケール対策、腐食対策			低沸点流体			
	(3) 発電所の環境保全対策技術等開発	硫化水素拡散予測技術			環境アセスメント手法開発			景観デザイン・温泉計測等			
	(4) 地熱発電の導入拡大に資する革新的技術開発	超臨界地熱発電技術									
	(5) 地熱エネルギーの高度利用化に係る技術開発						還元井延命化／未利用地熱活用／運転管理高度化技術				
開発予算 (会計・勘定別に事業費の実績額を記載) (単位:百万円)	会計・勘定	H 25fy	H 26fy	H 27fy	H 28fy	H 29fy	H 30fy	H 31fy	H 32fy	総額	
	一般会計	-	-	-	-	-					
	特別会計(需給)	182	619	1,349	1,415	1,138				4,702	
	開発成果促進財源	-	-	-	-	-					
	総予算額	182	619	1,349	1,415	1,138				4,702	
	(委託) (共同研究) : 負担率 2/3	75	455	1,164	1,379	1,133				4,702	
開発体制	経産省担当原課	資源エネルギー庁 省エネルギー・新エネルギー部 新エネルギー対策課									
	プロジェクトリーダー	-									
	委託先(*委託先が管理法人の場合は参加企業数及び参加企業名も記載)	<p>本事業では、約半数の事業が「(4) 地熱発電の導入拡大に資する革新的技術開発」に分類されており、目標はテーマごとに設定されているが、その内容については、上記の基本計画における研究開発項目(1)～(3)のいずれかに整理が可能であり、本中間評価に際し、以下の通り研究目標毎に再整理を行った。</p> <p>「超臨界地熱発電の実現可能性調査」に関しては「(4) 地熱発電の導入拡大に資する革新的技術開発」のままとした。</p> <p>※印のあるテーマは(4)「地熱発電の導入拡大に資する革新的技術開発」にて実施したテーマである。</p> <p>(1) 環境配慮型高機能地熱発電システムの機器開発 [研究目標] 地熱発電システムの熱効率を20%以上に向上させる技術の確立</p>									

		<p>(1.1)地熱複合サイクル発電システムの開発 ・株式会社東芝</p> <p>(1.2)地熱発電適用地域拡大のためのハイブリッド熱源高効率発電技術の開発※ ・一般財団法人電力中央研究所 ・国立大学法人富山大学</p> <p>(2)低温域の地熱資源有効活用のための小型バイナリー発電システムの開発 [研究目標]バイナリー発電のシステム効率を7%以上に資するシステムの確立</p> <p>(2.1)無給油型スクロール膨張機を用いた高効率小型バイナリー発電システムの実用化 ・アネスト岩田株式会社</p> <p>(2.2)温泉の蒸気と温水を有効活用し、腐食・スケール対策を施したハイブリッド型小規模発電システムの開発 ・アドバンス理工株式会社 (平成26年12月、アルバック理工株式会社から名称変更) ・株式会社馬淵工業所</p> <p>(2.3)スケール対策を施した高効率温泉熱バイナリー発電システムの研究開発 ・京葉プラントエンジニアリング株式会社</p> <p>(2.4)水を作動媒体とする小型バイナリー発電の研究開発 ・一般財団法人エネルギー総合工学研究所 ・株式会社アーカイブワークス ・国立大学法人東京大学</p> <p>(2.5)事業採算性と環境保全を考慮したバイナリー発電システムに供するタービン発電機の開発設計 ※ ・丸和電機株式会社</p> <p>[研究目標]スケール対策、腐食対策に係る技術の確立</p> <p>(2.6)炭酸カルシウムスケール付着を抑制する鋼の表面改質技術の開発 ・国立大学法人東京海洋大学 ・株式会社エディット ・国立大学法人横浜国立大学 ・国立大学法人長崎大学</p> <p>(2.7)低温域の地熱資源有効活用のためのスケール除去技術の開発 ※ ・国立大学法人大阪大学 ・国立研究開発法人産業技術総合研究所 ・株式会社超電導機構</p> <p>(2.8)電気分解を応用した地熱発電用スケール除去装置の研究開発 ※ ・イノベティブ・デザイン&テクノロジー株式会社 ・国立大学法人静岡大学</p> <p>(2.9)温泉熱利用発電のためのスケール対策物理処理技術の研究開発 ※ ・国立大学法人東北大学 ・東北特殊鋼株式会社 ・株式会社テクノラボ</p> <p>(2.10)バイナリー式温泉発電所を対象としたメカニカルデスケールリング法の研究開発 ※ ・国立大学法人秋田大学 ・株式会社管通 ・国立大学法人東北大学 ・国立大学法人東京海洋大学</p> <p>[研究目標]二次媒体の高性能化に係る技術の確立</p> <p>(2.11)環境負荷と伝熱特性を考慮したバイナリー発電用高性能低沸点流体の開発 ・国立大学法人東京大学 ・旭硝子株式会社</p> <p>(3)発電所の環境保全対策技術等開発 [研究目標]ガス漏洩防止技術や拡散シミュレーション技術等の確立</p> <p>(3.1)硫化水素拡散予測シミュレーションモデルの研究開発 ・日揮株式会社 ・学校法人明星大学</p>
--	--	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

		<p>(3.2)地熱発電所に係る環境アセスメントのための硫化水素拡散予測数値モデルの開発</p> <ul style="list-style-type: none"> ・一般財団法人電力中央研究所 <p>(3.3)温泉と共生した地熱発電のための簡易遠隔温泉モニタリング装置の研究開発</p> <ul style="list-style-type: none"> ・国立研究開発法人産業技術総合研究所 ・地熱エンジニアリング株式会社 ・横河電機株式会社 <p>(3.4)エコロジカル・ランドスケープデザイン手法を活用した設計支援ツールの開発</p> <ul style="list-style-type: none"> ・清水建設株式会社 ・株式会社風景デザイン研究所 ・学校法人法政大学 <p>[研究目標]発電所の高度利用に向けた技術(発電能力や利用率の回復・維持・向上のための技術、付加価値増大を実現する技術)等の確立</p> <p>(3.5)シード循環法によるシリカスケール防止技術の研究開発</p> <ul style="list-style-type: none"> ・国立大学法人富山大学 ・国立大学法人九州大学 ・三菱マテリアルテクノ株式会社 <p>(3.6)還元熱水高度利用化技術開発(熱水中のスケール誘因物質の高機能材料化による還元井の延命・バイナリー発電の事業リスク低減) ※</p> <ul style="list-style-type: none"> ・地熱技術開発株式会社 ・北九州市立大学 ・日揮株式会社 <p>(3.7)地熱発電プラントのリスク評価・対策手法の研究開発(スケール/腐食等予測・対策管理) ※</p> <ul style="list-style-type: none"> ・地熱技術開発株式会社 ・国立研究開発法人産業技術総合研究所 ・エヌケーケーシームレス鋼管株式会社 <p>(4)地熱発電の導入拡大に資する革新的技術開発</p> <p>[研究目標]超臨界地熱資源からの熱抽出が可能であることを示すこと、並びに、従来の地熱発電の発電コストと同等であることを示すこと。</p> <p>(4.1)天然・人工地熱システムを利用した超臨界地熱発電の発電量、経済性および安全性に関する詳細検討</p> <ul style="list-style-type: none"> ・国立研究開発法人産業技術総合研究所 ・国立大学法人東北大学 ・国立大学法人秋田大学 ・国立大学法人九州大学 ・地熱エンジニアリング株式会社 ・地熱技術開発株式会社 ・帝石削井工業株式会社 ・株式会社テルナイト ・富士電機株式会社 ・株式会社リナジス ・AGCセラミックス株式会社 ・金属技研株式会社 <p>(4.2)超臨界地熱場における革新的モニタリング及びシミュレーション技術の詳細検討</p> <ul style="list-style-type: none"> ・一般財団法人エンジニアリング協会 ・国立大学法人京都大学 ・伊藤忠テクノソリューションズ株式会社
<p>情勢変化への対応</p>		<p>平成26年4月に閣議決定されたエネルギー基本計画においても地熱発電は、発電コストも低く、安定的に発電を行うことが可能なベースロード電源を担うエネルギー源として位置づけられており、重要なテーマであるとの認識のもと、平成27年度には追加公募を実施した。</p> <p>平成28年4月に策定された「エネルギー・環境イノベーション戦略」において、温室効果ガス排出量を削減するポテンシャルが大きい、有望な革新的技術として地下の超高温・超高压の状態(超臨界状態)にある水を利用する地熱発電(以下、超臨界地熱発電)が挙げられた。こうした政府の政策を受け、平成29年度には、「超臨界地熱発電の実現可能性調査」が実施した。この案件は、次世代に向けた取り組みのため、平成30年度以降は、地熱発電技術研究開発から独立させ、「超臨界地熱発電技術研究開発」というテーマで継続することとなった。</p> <p>本プロジェクトは、当初は、平成25年度から29年度の5か年計画で進めていたところ、環境保</p>

	全対策技術について重要度が増したことや、最近注目されているIoT-AI技術等を適用した地熱エネルギーの高度利用化技術を開始する等の理由により、さらに3か年延長（終了は平成32年度）することとした。	
中間評価結果への対応	—	
評価に関する事項	事前評価	平成24年度実施 担当部 新エネルギー部 平成24年度 NEDO POST3 実施
	中間評価	平成27年度実施 担当部 新エネルギー部
	事後評価	—
Ⅲ. 研究開発成果について	<p>地熱発電技術研究開発</p> <p>1) 最終目標(平成29年度)</p> <p>ポテンシャルの高い地域への地熱発電の導入拡大を目的とし、既存の発電設備よりも、小型化・高効率化の地熱発電システムの機器開発及び低温域の地熱資源を活用したバイナリー発電システムを開発すると共に、環境保全対策や環境アセスメント円滑化に資する取り組みを行う。なお、公募により研究開発実施者を選定後、目標の具体化等を行うこととする。</p> <p>(1) 環境配慮型高機能地熱発電システムの機器開発 地熱発電システムの高効率化に資する技術(熱効率を20%以上に向上させる技術等)を確立する。</p> <p>(2) 低温域の地熱資源有効活用のための小型バイナリー発電システムの開発 未利用の温泉熱を利用した低温域のバイナリー発電について、熱効率7%以上に資するシステムを確立するとともに、スケール対策、腐食対策、二次媒体の高性能化に係る技術を確立する。</p> <p>(3) 発電所の環境保全対策技術等開発 ガス漏洩防止技術や拡散シミュレーション技術、発電所の高度利用に向けた技術(発電能力や利用率の回復・維持・向上のための技術、付加価値増大を実現する技術)等を確立する。</p> <p>2) 全体の成果(平成29年度末)</p> <p>(1) 環境配慮型高機能地熱発電システムの機器開発 気液分離後の熱水の熱エネルギーを利用したフラッシュ発電とバイナリー発電の複合サイクル発電システムが提案され、熱効率20%以上のシステム設計技術を確立した。 地熱とバイオマスを組み合わせたハイブリッド熱源発電システムが提案され、熱効率20%以上で事業成立が可能なシステム検討、スケール対策などの要素技術を開発できた。</p> <p>(2) 低温域の地熱資源有効活用のための小型バイナリー発電システムの開発 ・複数のバイナリーシステムが提案され、熱効率7.8%のタービン発電機設計技術や、温泉水から低圧蒸気を発生させスケールを除去するバイナリー発電システムによる熱効率8.7%などが実証できた。 ・スケール対策では、源泉を止めずに付着したスケールを除去するデスケリング技術や、薬品を使用せずスケール付着抑制させる電気分解処理技術や電磁+超音波処理技術、上流でスケール濃度を低減させる磁気分離技術などを確立した。 ・高性能低沸点作動流体の構造設計手法、合成手法、物性値評価による選定に係る技術を確立した。</p> <p>(3) 発電所の環境保全対策技術等開発 ・風洞実験の代替となる硫化水素の拡散シミュレーションを開発し、高精度な濃度予測とともに開発費・開発期間の半減が実現できた。 ・ステークホルダーとの合意形成に利用できるエコロジカル・ランドスケープ手法、温泉地との共生に有効な簡易遠隔温泉モニタリング装置、運用向上を図った熱発電プラントのリスク評価・対策手法などの技術を確立できた。</p> <p>3) 個別テーマの成果</p> <p>(1) 環境配慮型高機能地熱発電システムの機器開発</p> <p>(1.1) 地熱複合サイクル発電システムの開発 気液分離後の熱水の熱エネルギーを利用したフラッシュ発電とバイナリー発電の複合サイクル発電システムを開発した。 低沸点媒体の要求性能と新旧媒体の比較および熱サイクル効率ポテンシャルの比較から、複合サイクルに適する低沸点媒体を選定した。井戸条件および各要素機器の運転条件をパラメータまたは制約条件として、上記低沸点媒体を用いたシステムの最適化を行い、熱効率20%へ到達する複合サイクルのヒートバランスを構築し、他の発電方式と比較し、優位となる条件を推測した。 構築したヒートバランスに基づき、バイナリータービンの通路部性能を検討し、軸シールシステム設計した。それらの結果を元にバイナリータービン計画図を作成した。そのヒートバランスに従って、上記低沸点媒体の特性に応じた各種熱交換器を計画した。</p>	

また、2種のスケール抑制手法を検討した結果、カルシウム結合剤とシリカ分散剤を用いる手法を選定し、それら薬剤添加によるスケール抑制効果を確認した。

目標である熱効率20%以上を達成できるシステム設計を完了した。

(1.2) 地熱発電適用地域拡大のためのハイブリッド熱源高効率発電技術の開発

地熱とバイオマスを始めとする他の未利用エネルギーとを組み合わせたハイブリッド熱源高効率発電技術を開発。

従来の地熱発電システムに蒸気過熱器を設置し、タービンに流入する前の地熱飽和蒸気を外部熱源(600℃)により約400℃まで過熱することによって、地熱発電システムとしての発電効率が20%を上回り、発電出力が約3割増加する(冬期条件)ことを示した。

また、日本国内の設備容量が9MWeまでの地熱発電システムとのハイブリッド化にはバイオマスが外部熱源として有望であり、国内3地域を対象としたバイオマスのポテンシャル調査に基づき、ハイブリッド熱源発電システムの発電原価を試算したところ、いずれの地域においても25～30円/kWh程度と、“間伐材等由来の木質バイオマス”のFIT価格(40円/kWh)を下回ることが分かった。

さらに、光ファイバーのコアをむき出しにしたものをセンサーとして光源と検出器を接続し、スケール付着に伴う屈折率変化を光応答として検出できるスケールセンサーを開発した。松代温泉および澄川地熱発電所にて、開発したセンサーを地熱流体に暴露する試験を実施し、炭酸カルシウムおよびシリカスケールのセンサー表面への析出をセンシングすることに成功した。また、滝上地熱発電所にて、スケールセンサーを組み込んだ小規模実証試験器を用いた暴露加速試験を実施し、蒸気過熱に起因するスケール付着や腐食等の問題が認められなかったことを確認した。

(2) 低温域の地熱資源有効活用のための小型バイナリー発電システムの開発

(2.1) 無給油型スクロール膨張機を用いた高効率小型バイナリー発電システムの実用化

低沸点冷媒の性能向上とポンプの消費電力低減、熱交換器効率向上を狙った無給油型のスクロール膨張機を搭載した小型バイナリー発電システムを開発した。

温熱源80℃の実証試験では熱効率4.3%であったが、温熱源が100℃を超える温泉蒸気や、新媒体の利用、熱の二次利用等で高効率化の見通しを得た。また、コスト11百万円の見込みを得、事業化ではメリットとシステムのアウトソーシングで達成できる見通しを得た。さらに、膨張機駆動部の潤滑油不使用の連続運転およびシール材のスクリーニングを完了し、ラボ評価での可能性を見出した。

(2.2) 温泉の蒸気と温水を有効活用し、腐食・スケール対策を施したハイブリッド型小規模発電システムの開発

温水発電(3.2kW)+蒸気発電(1.2kW)により4.4kWの発電出力が得られた。実証試験での発電効率は、温水発電の発電効率は5.3～6.3%であったが、蒸気発電は2.6%で共に未達であった。温水発電は、熱交換器などの実証試験結果により、発電の実用化は可能(蒸気発電は技術課題の他、蒸気量不足から温泉地での実用化は困難と判断した)

(2.3) スケール対策を施した高効率温泉熱バイナリー発電システムの研究開発

高効率温泉バイナリー発電を実現するための、スケール除去フラッシュタンク、高効率蒸気/冷媒熱交換器、低圧蒸気制御システム、小型蒸発式凝縮器を開発し、製作した。泉源に設置した実証試験で発電効率8.7%を確認できた。

(2.4) 水を作動媒体とする小型バイナリー発電の研究開発

ツインエントリータービン、水潤滑軸受、可変ノズル機構を組み込んだ10 kW級および20 kW級タービン発電機装置を設計・製作を完了した。伝熱面の流路形状最適化により、従来平滑面より熱伝達率が約5倍向上する熱交換器を提案した。水バイナリー発電機を世界で初めて温泉地に導入し、温泉水温度65℃以上での発電を確認した。

(2.5) 事業採算性と環境保全を考慮したバイナリー発電システムに供するタービン発電機の開発設計

地球温暖化係数GWP=1で不燃性のハイドロフルオロオレフィンを作動媒体とした磁気軸受搭載の遠心式タービンを設計完了し、仕様を決定した。タービン形状最適化により、断熱効率86%を達成し、年間システム効率(発電端)は7.8%の可能性を得た。また、4～5年で初期投資回収が可能な試算を得た。

(2.6) 炭酸カルシウムスケール付着を抑制する鋼の表面改質技術の開発

実験室環境で、スケール付着量を80%低減する材料を開発した。

実際の温泉発電プラントの環境にてメンテナンスが必要となるまでの運転期間を現在の使用材料の現況と比較して1.5倍以上に延長する材料の設計指針とそのシステムを提案した。

(2.7) 低温域の地熱資源有効活用のためのスケール除去技術の開発

地下水シリカ対策用として処理温水量5t/hの磁気分離装置を試作し、シリカ濃度を目標の150ppmまで低減できる性能を確認した。スケールアップの単機容量は、経済的で、メンテナンス性・安全管理上も

現実的である10t/hとの結論を得た。

(2. 8) 電気分解を応用した地熱発電用スケール除去装置の研究開発

電気分解によるスケール除去理論モデルを作り、複数箇所て採取した源泉をマイクロチャネル実験結果との照合しモデルの妥当性を検証できた。有隔膜式電解装置において、周辺配管および熱交換器へのスケール付着抑制効果があることが実証出来た。既存スケール対策(薬剤+機械式)に対し、20kWまでの発電に必要な湯量に対するシステム運用条件の試算でコストの優位性が得られた。

(2. 9) 温泉熱利用発電のためのスケール対策物理処理技術の研究開発

スケール対策の年間運用コストを、従来の浚渫もしくは薬注による対策コストと比較し20%以上低減することを目標として、超音波及び電磁処理のハイブリッドスケール防止装置とその運用方法体系化に係る技術を開発した。複合処理効果確認のための基礎的実験系の構築、実験及び実証試験のための高周波電源プロトタイプ製作、温泉源泉の現地調査、及び水質等のデータベース構築を行い、高周波電源プロトタイプ開発、国内15～20所の現地調査、過去の電磁処理導入事例から500件のデータベース化等の目標を達成した。複合処理効果等のデータ取得を行い、超音波処理における使用周波数等の検討、発信部の耐熱等の耐久化を図ることで、3か所て実証試験を実施し、温泉地の従来スケール対策に対し最高約90%ランニングコスト低減を確認し、当初最終目標以上の成果を達成した。

(2. 10) バイナリー式温泉発電所を対象としたメカニカルデスケーリング法の研究開発

メカニカルデスケーリング法の経済性及び実用化後の波及効果の評価、スケール構造・組成とスケール強度との関係についての検討解析、モニタリング装置開発のためのスケール付着状況計測の試験装置の準備及び基礎データの収集、並びにスケール除去装置の小規模な試作機開発を実施した。以上の研究開発の結果、新手法が将来的に経済的導入可能性の見込みがあること、鉱物学的・結晶学的見地からデスケーリング装置の設計指針を作成すること、非破壊で外部からスケール付着厚さを±10mmの精度で測定可能であることを示すとともに、温泉熱水蒸気二相流中でのデスケーリング実験成功の成果を達成し、50m長の配管に対して、年間運用コストを20%以上低減可能なことを示した。

(2. 11) 環境負荷と伝熱特性を考慮したバイナリー発電用高性能低沸点流体の開発

流体の熱物性値に対する指針獲得のための熱交換器シミュレーション手法を構築した。また、低沸点流体の伝熱性能評価のための疑似バイナリーシステムの構築に向けた予備実験を実施し、新設実験装置の設計を完了した。さらに、新しいバイナリー発電用熱交換器構造を検討するための2相流解析手法を構築した。バイナリー発電に必要な物性値(沸点、熱伝導度、潜熱など)の推算手法を構築し、分子構造の候補構造を選出し、合成可能な試料の合成を行い、初期毒性評価で低毒性と確認された構造について、その混合物も含めて物性を評価し、要件(目標:沸点30～50℃程度、ODPIほぼ0、GWP100以下)を満たす最適な物を3種類(混合物含む)選出した。

(3) 発電所の環境保全対策技術等開発

(3. 1) 硫化水素拡散予測シミュレーションモデルの研究開発

国内の地熱発電所等における硫化水素放散に関する環境影響評価等の先行事例の調査等を行い、拡散予測シミュレーションモデル構築に当たり考慮すべきパラメータ等を明確化した。また、抽出した硫化水素拡散挙動影響因子の影響を踏まえて、拡散予測評価を行うための数値モデルを整備した。風洞実験結果と数値モデルによる計算結果を比較し、計算による主流方向の速度分布は、複雑な地形にも関わらず、実験結果を比較的良く再現できた。一方、拡散については、複雑地形が乱流発生に大きく影響して、目標とする評価精度を達成できず、さらに乱流モデルの開発が必要である。

(3. 2) 地熱発電所に係る環境アセスメントのための硫化水素拡散予測数値モデルの開発

風洞実験の代替として用いることができる二種類の硫化水素拡散予測数値モデル(簡易予測数値モデル、詳細予測数値モデル)を開発した。

簡易予測数値モデルを用いて風洞実験の再現計算を行った結果、排気諸元や建屋・地形、浮力条件を適切に設定することにより、風洞実験で得られた最大着地濃度を概ね良く再現することが可能であり、環境アセスメントの事前検討や配慮書作成等に活用できることが分かった。

詳細予測数値モデルを用いて再現計算を行った結果、周辺地形や発電所建屋を精緻に再現することにより、硫化水素の着地濃度および空間濃度を高精度で予測可能であり、風洞実験の代替として環境アセスメントに適用できることが明らかとなった。

(3. 3) 温泉と共生した地熱発電のための簡易遠隔温泉モニタリング装置の研究開発

モニタリング装置のプロトタイプ器開発を通して実証試験器を製作し、国内地熱・温泉地域11カ所で最大約1年半の実証試験を行った。実証試験での性能や課題を検討・改良し、実用可能な実用モデルを製作した。本装置の実用化時の製造コストならびにコスト低減のための手法を取りまとめ、今後の市販化への目途を立てることができた。

(3. 4) エコロジカル・ランドスケープデザイン手法を活用した設計支援ツールの開発

地域の自然環境や風致景観に配慮した地熱発電の開発計画を推進するためのデザイン手法を開

発すると共に、その設計支援ツールを開発。エコロジカル・ランドスケープ適用手法を明確化し、プロセスの調査・分析、計画を実施するためのマニュアル「自然環境・風致景観配慮マニュアル」、「配慮手法パタン参考集」、「支援アプリ」を作成した。

(3.5) シード循環法によるシリカスケール防止技術の研究開発

凝集剤添加によりシリカとアルミニウムの同時除去に成功した。、効率的な過飽和シリカを除去するシード循環装置を用いた試験用プラントの設計・製作を完了し、連続シリカ除去試験を行い、シリカ除去条件を一部把握できた。また、実用化プラントを設計し、事業コストを試算したところ、産廃費が経費の60%を占めることが判明し、今後の課題として認識した。

(3.6) 還元熱水高度利用化技術開発（熱水中のスケール誘因物質の高機能材料化による還元井の延命・バイナリー発電の事業リスク低減）

シリカ回収事業の事業性FSは還元井延命効果なしバイナリーとの併設で内部利益率IRR10%（7年）以上を達成した。また、コロイダルシリカ回収技術の開発は、パイロットプラントの設計・製作・実証を通じて葛根田の熱水からコロイダルシリカを生成し、利用ユーザ（中級品）の要求レベル品質を達成した。リチウム回収の効率については、シリカ回収後の還元熱水を用いることで、5割から9割に向上できることが分かった。

さらに、地熱コロイダルシリカ回収設備の実規模概念設計を実施し、実用化に必要な技術課題を抽出した。還元井延命化効果の推定では、シリカが250ppmに低下し、模擬地層装置による実験で還元井地層へのシリカ付着がほとんどないことを実証した。結果として、3万kWの発電所で46億円（15年）の事業性向上を確認した。

(3.7) 地熱発電プラントのリスク評価・対策手法の研究開発(スケール／腐食等予測・対策管理)

リスク評価システムの開発を実施し、国内事例・海外事例の整理を行い、概念設計と複数の実証試験候補地点の選定を完了した。腐食・浸食・スケール付着予測技術の開発を実施して、地化学反応モジュール(EXCELベース)を製作し、既存三次元流体シミュレーションの検証を実施して、基本設計を完了した。地熱腐食・スケールについて、既存の材料腐食報告書、及び関連論文164件を収集し、データベースシステムの設計を完了した。材料選定の研究開発を実施し、既存事業者からの聞き取り調査21件、新規情報37件の収集を完了した。プラントリスク評価システムのためのモニタリング技術開発により計測機器設計を完了し、モニタリング手法の抽出と試験における課題を整理した。地熱発電プラントリスク評価実証試験の検討を実施して、実証試験装置設計を完了した。

(4) 地熱発電の導入拡大に資する革新的技術開発

(4.1) 天然・人工地熱システムを利用した超臨界地熱発電の発電量、経済性および安全性に関する詳細検討

現実的な規模の天然超臨界地熱システム、もしくは人工地熱システムを使用して、1坑井あたり27～45MW、貯留層あたり100MW以上の発電が可能な貯留層モデルを構築した。一方、間接熱回収については、坑井周りの透水性を高く設定しても数MW規模の発電しか及ばず、本手法では経済的優位性を得ることは困難との結論となった。また、現実的な条件を仮定したところ、現在の地熱発電所の発電コストと同等であることを確認した(9.8～12.6円/kWh)。透水性不十分の場合を想定した人工貯留層造成技術については、原理的には可能であるがそれを実現するための工学的手法については今後も継続的検討が必要となる。

(4.2) 超臨界地熱場における革新的モニタリング及びシミュレーション技術の詳細検討

地震学的手法を用いた超高温環境条件において適用可能な長期連続観測システムの手法開発の検討と、世界的に主流となるTHMC連成モデルの検討を行った。最新の弾性波探査の技術を効果的に活用することにより、最適な試掘サイトの選定や貯留層造成のモニタリングが効果的に実施することが可能となることが分かった。坑内震源としてACROSS型震源を用い、光ファイバーを用いた超臨界水域で散乱する地震波をDAS計測(分布型地震計)するシステムを考案した。

投稿論文	「査読付き」27件、「その他」4件
特許	「出願済」16件(うち国際出願0件)、「登録」0件 特記事項：特になし
その他の外部発表(プレス発表等)	「研究発表・講演」157件、「新聞・雑誌等への掲載」15件、展示会への出展等34件

IV. 実用化・事業化の見通しについて

硫化水素の拡散シミュレーションについては、経済産業省電力安全課と情報交換を行った結果、「改訂・発電所に係る環境影響評価の手引 平成29年5月改訂(経済産業省)」において従来の風洞実験に代替する手法である数値モデルが採用された。また、安比地域及び鬼首地域のそれぞれの環境アセスメントにおいても同手法が適用された。

エコロジカル・ランドスケープの手法については、経済産業省、環境省、及び日本地熱協会にてそれぞれ説明し、好評を得た。また、民間事業者からも個別に説明も実施しており、環境アセスメントやステークホルダーとの合意形成に利用を希望する事業者が数社確認されている。

	<p>る。</p> <p>簡易遠隔温泉モニタリング装置開発では、「温泉モニタリング装置実用モデル」は、製品時の基本的な構成・構造を実現しており、2019年度にも本装置とクラウドサービスを販売開始する計画を立案しつつある。また、市場調査の結果、取得したデータの分析・解析サービスに関する要望もあることが判明しており、温泉変動の解析、温泉水/熱エネルギーの最適利用等に関するサービスもビジネスとして成立する可能性が高いと判断している。</p> <p>地熱発電プラントのリスク評価・対策手法開発では、エクセルベースでWEB上からアクセスできるリスク評価システムを開発したので、開発事業者のウェブサイトからアクセス可能なシステムを公開する予定である（平成30年度内）。さらに、予測技術として、二相流配管の流動形態、腐食、スケール付着などのメカニズムを推定できる手法を開発し、実証試験や発電所の諸現象について説明できるモデルの提示を行うことが可能になり、今後、公表を検討している。</p>	
V. 基本計画に関する事項	作成時期	平成25年4月 作成
	変更履歴	平成27年9月 研究開発項目③に「高度利用化に向けた技術」を追加し改訂
		平成29年2月 研究開発項目に「超臨界地熱発電の熱抽出に関する実現可能性調査等」を追加し改訂
	平成30年2月 研究開発の実施期間の延長及び研究開発項目の拡充等のため改訂	

プロジェクト用語集

用語	説明
エンタルピー	エネルギーの次元を持ち、物質の発熱・吸熱挙動にかかわる状態量。 エンタルピー=(内部エネルギー)+(圧力)×(体積) で定義される。
応力腐食割れ	応力と腐食の共同作用によって生ずる割れ。ある材料が引張り応力を受けていて、その材料に特融の腐食環境にあるときに発生する。
過熱蒸気	ある圧力のもとでその圧力での飽和温度以上の温度を持つ水蒸気。
還元井	汽水分離器で分離された熱水を地下に戻すための井戸
汽水分離器(フラッシュャー)	熱水とともに出てきた蒸気を分離して取り出す装置
凝縮器	蒸気を冷却して液体にする装置
コロイダルシリカ	コロイド状態(物質が分散媒の中で細かい状態で分散した状態)で存在するシリカで1~100nmの大きさで分散している。熱水中の溶解性シリカは、熱水が地上に噴出した後、温度効果、PH変化により一部がコロイダルシリカに変化する。さらに重合が進むとシリカスケールが生成する場合がある。
作動媒体	他から熱エネルギーの供給を受け、仕事に変える物質。バイナリー発電で用いられる低沸点媒体はこれの一種。
蒸発器	液体を加熱して蒸気を発生させる装置
シリカ	二酸化ケイ素(SiO ₂)の通称。地熱井より噴出する熱水中にしばしば溶存している。熱水の温度、圧力等の変化により溶解度が変化する際にスケールとして析出し、輸送阻害、熱伝導率低下等の障害を発生する。
浸食(エロージョン)	砂粒等の固体粒子、流水中の空気泡の崩壊時の衝撃圧力等により金属などの表面が機械的に微粒に破壊されていく状態。
スクロール型	一対のうず巻き形をした固定スクロールと可動スクロールとで構成されているもの。
スケール	地熱流体から配管等への析出物で、シリカ、炭酸カルシウム、硫化鉱物などがある。流体温度や圧力が急速に変化したり、流体混合があったり、溶存ガスの離脱により、溶存成分が過飽和になりスケールが発生する。スケールの付着は熱交換器における熱交換効率の低下や、配管閉塞等の問題を引き起こすため、定期的な除去作業、析出抑制剤の利用などの対策が必要となる。
生産井	地熱貯留層から蒸気や熱水を取り出すための井戸
超臨界地熱発電	超臨界地熱資源から生産される地熱流体を利用した発電システム。貯留層温度が400~500℃と高温であり、耐熱性のある資機材が求められるとともに、耐腐食性の地熱材料の開発が必要となる。なお、我が国では超臨界地熱資源が確認されていないので、その分布状況把握も重要な課題となる。
低沸点媒体	バイナリー発電で用いられる大気圧下で沸点が100℃以下の媒体
熱交換器	熱を異なる2つの熱媒に移動させるための設備。
バイナリー方式	一般的に80~150℃の中高温熱水や蒸気を熱源として低沸点の媒体を加熱し、蒸発させてタービンを回して発電する方式
ヒートバランス	あるシステムについて、熱の発生、吸収、放出、転換等の収支(熱収支)のバランスを取ること。
不凝縮ガス	地熱性から噴出する蒸気中に、水蒸気以外に含まれる二酸化炭素、硫化水素等のガスである。
復水器	タービン排気を冷却して水に戻す装置。地熱発電所では凝縮水をボイラへ給水する必要が無いので直接接触式の復水器が採用されている。
腐食(コロージョン)	金属などが使用環境との化学反応によって失われていく状態。

フラッシュ方式(蒸気発電方式)	地熱貯留層にある約200~350°Cの蒸気と熱水を取り出し、気水分離器で分離した後、その蒸気でタービンを回して発電する方式である
硫化水素	H ₂ S。火山ガスや温泉、地熱水に含まれる。腐卵臭を持つ有毒の気体。
冷却塔	冷却水を冷却するための装置。豊富な冷却水を得ることが難しい発電所に採用される。
CFD	数値流体力学(英: Computational Fluid Dynamics)。流体の運動に関する方程式をコンピュータで数値解析し流れを観察する。
EGS	Enhanced/Engineered Geothermal System の略。人工的に貯留層に手を加え、生産量増大を図る技術であり、具体的には、①高温岩体 ②透水性増大 ③涵養の3つに大別される。

I. 事業の位置付け・必要性について

I.1 NEDO の関与の必要性・制度への適合性

I.1.1 NEDO が関与することの意義

①政策的重要性

2011年の東日本大震災以降、再生可能エネルギーの導入拡大が望まれる中、我が国は、世界第3位の地熱資源ポテンシャルを有すると推定されており、地熱発電に大きな期待が掛かっている。

2012年には、再生可能エネルギーの固定価格買取制度が施行され、地熱では、15MW未満では40円/kWh、15MW以上では26円/kWhという買取価格が設定され、地熱開発事業者にとって、一定の採算性が確保されるに至った。

2014年には、「エネルギー基本計画」が閣議決定され、地熱発電の2030年度における導入見込量として最大で約155万kW（2015年度実績52万kW）、発電電力量113億kWh（2015年度実績26億kWh）が掲げられ、地熱発電のさらなる導入拡大が期待されている。

一方、地熱開発の促進に対する課題の一つである国立・国定公園特別地域内での開発制限については、2012年に環境省から、同特別地域の第2種及び第3種では条件付きで開発を許可する通知が出され、その後、2015年にも、第1種特別地域へ傾斜掘りでの進入が条件付きで許可されるに至った。これは、地熱資源ポテンシャルがより多く賦存する国立・国定公園特別地域内での開発が可能となり、今後、地熱開発がより一層促進される環境が整ったことを意味する。

また、課題の一つである温泉事業者との合意形成については、2012年に環境省より、「温泉資源の保護に関するガイドライン（地熱発電）」が策定され、温泉資源を保護しながら地熱開発を円滑に進めるべき手法が提案された。今後、地熱開発と温泉事業とが共存共栄して、地域経済を発展させる一事業になるよう期待される。

さらに、COP21（パリ協定）により、2030年以降も地球温暖化ガス排出量の要求レベルが益々引き上がることを受け、2050年を目標とした同排出量を大幅に削減しうる次世代の革新的技術が求められている。これを受け、2016年に内閣府による「エネルギー・環境イノベーション戦略」が設置され、分野別革新技術の中で次世代地熱発電技術が特定され、その中で、超臨界地熱発電技術が注目されることとなった。

②NEDOの地熱事業の経緯

NEDOは、1980年設立当初より、地熱事業に携わっており、地熱資源の調査として、「地熱開発促進調査」を実施した。これは、全国の地熱資源が賦存されると推定される地域を対象として、約70地域で実施された（1980～2010年）。この調査で商業発電を開始した箇所は、八丈島地熱発電所（東京電力）のみと成果は十分とは言えなかったが、現在、上記の政府による支援策により、多くの新規開発案件が立ち上がっており、こうした案件の多くは、この地熱開発促進調査の成果を利用しており、ようやくNEDO事業の成果が多くの事業者にも利用され、その効果が出始めたといえる。

また、上記の地熱資源調査の他、技術開発事業においても、「地熱探査技術等検証調査」や「熱水利用発電プラント等開発」が実施された（1980～2003年）。これより、地熱探査技術、地熱井掘削技術、貯留層評価・貯留層管理技術、EGS技術、地上設備・発電システム技術等の研究開発により、地熱開発の導入・促進に貢献した。

③JOGMECとの業務分掌とNEDOの取組み

「独立行政法人の事務・事業の見直しの基本方針」（2012年、閣議決定）を受け、NEDOがこれまで実施してきた地熱開発関連事業のうち、地熱資源調査や地熱資源探査技術開発の業務は、石油天然ガス金属鉱物資源機構（JOGMEC）へ移管されることとなった。これ以降、政府による地熱関連の事業の主体は、JOGMECで実施されるようになった。

NEDOは、技術開発の中で、地熱発電の利用に関する技術開発（環境保全対策技術を含む）を担当することとなり、2013年からNEDO新エネルギー部で「地熱発電技術研究開発」のプロジェクトがスタートした。また、次世代地熱発電技術である「超臨界地熱発電技術研究開発」も2018年から開始された。

I.1.2 実施の効果

2030年頃に、最大で約155万kWの発電容量、及び110億kWhの発電量の達成が見込まれる。こ

れによる CO2 排出削減量は、約 620 万トン-CO2/年である。また、これまでのバイナリー発電システム開発や IoT-AI 技術等を適用した運転管理の高度利用化技術の成果等により、多くの温泉地等で中小規模地熱発電や熱利用が普及し、地域経済の活性化も見込まれる。これは、大規模地熱開発へも、地域との合意形成等に役立つ資料を提供し、その導入・拡大に資する。

また、我が国は、地熱開発の経験が50年以上あり、世界でも地熱技術が高い国と評価されている。今後は、NEDOプロジェクトで開発した技術を、海外へ向けて提供（地熱用タービン発電機の納入、JICA事業を通しての地熱開発の支援、海外での開発投資等）していくことが国際アピールとして重要となる。

1.2 事業の背景・目的・位置付け

1.2.1 事業の背景

①我が国の状況

2012年の再生可能性エネルギーに対する固定価格買取制度以降、地熱発電所の商業発電開始は順調に伸びており、2017年度末までに合計56件の増加が確認されている。この傾向は今後も継続することが予想される。しかしながら、発電開始される案件は、いずれも中小規模の案件であり、10MW以上の大規模案件は、開発リードタイムが10年以上と長期となり、すぐには成果が出ないという課題がある。

こうした中、大規模案件としては、山葵沢地域（秋田県）では、2018年現在、建設工事中であり、2019年に商業運転が予定されている。また、安比地域（岩手県）は、2018年に環境影響評価手続きが終了し、2019年に建設工事を着手する予定である。これらは、いずれもNEDO地熱開発促進調査により、地熱資源の賦存が確認された地域であり、今後、こうした地域で地熱発電所が立地されることが期待される。

また、既存の地熱発電所で、未利用熱水を利用したバイナリー発電機の設置が、滝上発電所（大分県、2017年）や山川発電所（鹿児島県、2018年）でそれぞれ実施されており、未利用熱の有効活用が図られている。

一方、「地熱発電の推進に関する研究会 平成28年度報告書（経済産業省）」によると、平成28年度末時点において、初期調査から開発段階にある地熱開発案件すべてを含めても出力規模が約35万kWであり、平成42年度の導入目標を達成するためには、更なる案件（約60万kW）が必要と報告されている。

また、前述のとおり、自然公園内での開発が推進されるために、環境に配慮した取り組みが必要不可欠とされるところ、開発のための具体的なルール化や環境保全対策技術の向上等、解決されるべき重要な課題は少なくない。

さらに、温泉地の中には、既存の温泉井を利用して、小規模な地熱発電を行う事例も少しずつ増えており、発電と合わせた熱利用により、地場産業（特に、農業等）の発展に貢献している成功事例もある。こうした取り組みは、地域経済の発展とともに、地熱開発事業者と温泉事業者との合意形成が困難なケースの解決策にも繋がり、温泉地で地熱開発を促進していくために、上記の成功例の実績を数多く積み上げていくことは重要と考えられる。

加えて、既存の地熱発電所の発電量低下も大きな課題となっており、それらの発電能力の回復・維持・向上に資する技術開発にも取り組むことが必要である。

②世界の動向

再生可能エネルギーの拡大が推進されている中、地熱発電については、火山国である地熱資源を保有する米国、フィリピン、インドネシア、メキシコ、ニュージーランド、イタリア等で、国家レベルで導入拡大に向けた取組が実施され、発電設備容量や発電量は年々上昇を続けている。この中でも、インドネシアの開発ラッシュは突出しており、日本企業の総合商社（三菱商事、住友商事、丸紅、伊藤忠）や電力会社（九州電力、東北電力）も資本参加を行っており、積極的な海外活動を展開している。

また、世界の地熱用タービン発電機シェアでは、日本のメジャーな重電メーカー3社（三菱日立パワーシステムズ、東芝及び富士電機）で約3分の2を占めており、国際競争力があり、今後も、シェアの維持が期待される。

アイスランドでは、電力構成比の中で地熱の占める割合は、25%と非常に高く、発電のみならず熱利用も盛んに行われており、発電及び熱利用含むエネルギー比率では、地熱の占める割合は60%となり、世界一、地熱資源を有効活用している国といえる。近年、深部高温領域をターゲットとする掘削のプロジェクトIDDP（Iceland Deep drilling Project）が実施され、成果が挙がっており、今後の動向についても注目されている。

地熱に関する国際機関であるIGA（International Geothermal Association、設立1988年）では、5年に一度国際会議WGC（World Geothermal Congress）が開催されている（日本では、2000年に、別府および盛岡で開催）。そこでの報告によると、2014年末時点での世界の地熱発電設備容量は、26か国で12,635MWe、年間発電量は約74TWhであり、年々ほぼ線形に増加している。この5年間の増加量は、ケニア、米国、トルコ、及びニュージーランドが多い。一方、直接利用の設備容量は、70,329MWt、年間エネルギー利用量は、約163TWhであり、指数関数的な増加を示す（この中には、地中熱利用も含まれる）。

また、我が国は、JICAによりODA活動が実施され、アフリカ（ケニア、エチオピア、ジブチ等）、東南アジア（インドネシア等）、及び中南米（コスタリカ、ペルー、ボリビア、エクアドル等）のそれぞれの諸国に対して、人材育成、探査技術の技術開発、円借款等の資金提供、試掘支援等の活動を実施している。

1.2.2 事業の目的、位置づけ

地熱開発促進の課題としては、大きく2つあり、一つは、技術的課題（資源の分布、質、量等）、もう一つは、その他の課題（採算性、ステークホルダー、環境、インフラ等）である。技術課題としては、地熱資源のリスクであり、資源開発の本質的な課題である。また、操業中に蒸気生産量が低下し、発電出力が落ちることである。そのほか、井戸や地上設備に関し、材料の腐食やスケール問題がある。

一方、その他の課題としては、まず採算性であるが、これは、再生可能エネルギー全般に言えることで、いかに発電コストを下げられるかという課題である。また、地熱特有の課題としては、温泉事業者との合意形成や、自然公園特別地域のような環境保全対策の要求レベルが高い地域で、いかに円滑に開発を行うかも重要な課題となる。なお、最近では、系統連系がひっ迫し、新規発電事業に対する送電枠が制限されている状況であり、こちらの課題も少なくない。

そうした課題に対応するため、経済産業省、JOGMECそしてNEDOで役割分担して、それぞれ事業を推進している。

経済産業省は、固定価格買取制度の買取価格の設定、地熱開発に対する理解促進事業、系統連系に対する課題対応等を担当している。

JOGMECは、前述のとおり、地熱開発事業の主体的な役割を担っており、地熱資源調査に係る助成金事業、リスクマネー低減に資する出資事業・債務保証事業、地熱資源調査事業、地熱探査技術開発事業、その他（地熱技術の情報提供・指導や国際連携等）である。

NEDOは、技術開発事業のうち、地熱発電利用技術、環境保全対策技術、次世代地熱発電技術（超臨界地熱発電技術）等を担当している。

こうした中、2015年より、「地熱発電の推進に関する研究会」（資源エネルギー庁）が開催され、エネルギー基本計画の2030年目標達成に向け、3つの柱（①新規開発地点の開拓、②事業環境の整備、③地域理解の促進）が提示された。このうち、「②事業環境の整備」の中に技術開発事業が含まれており、NEDOが果たすべき役割は大きく、その成果が期待されている。

本事業では、自然公園内特別地域での地熱開発を含め、地熱発電の導入拡大を促進することを目的とし、2030年のエネルギーミックス実現に向け、我が国の地熱発電容量155万kWの達成に資する。これによるCO₂排出削減量は、約620万トン-CO₂/年である。

併せて、既存の発電所や温泉地等で未利用になっている地熱資源を、発電及び熱利用に有効に使用することにより、分散型エネルギーを確保し、地域の防災対応や経済発展の貢献に資する。

II. 研究開発マネジメントについて

II.1 事業の目標

ポテンシャルの高い地域への地熱発電の導入拡大を目的とし、既存の発電設備よりも、小型化・高効率化の地熱発電システムの機器開発及び低温域の地熱資源を活用したバイナリー発電システムを開発すると共に、環境保全対策や環境アセスメント円滑化に資する取り組みを行う。

研究開発項目毎の目標と目標値の設定根拠を表 II-1 に示す。

(1) 環境配慮型高機能地熱発電システムの機器開発

地熱発電システムの高効率化に資する技術(熱効率を20%以上に向上させる技術等)を確立する。

(2) 低温域の地熱資源有効活用のための小型バイナリー発電システムの開発

未利用の温泉熱を利用した低温域のバイナリー発電について、熱効率7%以上に資するシステムを確立するとともに、スケール対策、腐食対策、二次媒体の高性能化に係る技術を確立する。

(3) 発電所の環境保全対策技術等開発

ガス漏洩防止技術や拡散シミュレーション技術、発電所の高度利用に向けた技術(発電能力や利用率の回復・維持・向上のための技術、付加価値増大を実現する技術)等を確立する。

(4) 地熱発電の導入拡大に資する革新的技術開発

上記(1)～(3)以外で地熱発電導入拡大に資する革新的技術開発を行う。

表 II-1 研究開発目標と根拠

研究開発項目	研究開発目標	根拠
(1) 環境配慮型高機能地熱発電システムの機器開発	地熱発電システムの高効率化に資する技術(熱効率を20%以上に向上させる技術等)を確立する。	国内既存地熱発電所の実績である平均14%に対し、4割改善となる20%を目指す。
(2) 低温域の地熱資源有効活用のための小型バイナリー発電システムの開発	未利用の温泉熱を利用した低温域のバイナリー発電について、熱効率7%以上に資するシステムを確立するとともに、スケール対策、腐食対策、二次媒体の高性能化に係る技術を確立する。	熱効率について、現状の先端技術であるアンモニアバイナリー発電システムの設計熱効率(年平均5.41%、冬季6.57%、夏季2.76%)の3割改善となる年平均7%とした。
(3) 発電所の環境保全対策技術等開発	ガス漏洩防止技術や拡散シミュレーション技術、発電所の高度利用に向けた技術(発電能力や利用率の回復・維持・向上のための技術、付加価値増大を実現する技術)等を確立する。	環境アセスメントで必要な硫化水素拡散挙動予測が簡易に短期間でできれば、アセス期間が短縮できる。
(4) 地熱発電の導入拡大に資する革新的技術開発	上記(1)～(3)以外で地熱発電の導入拡大に資する革新的技術開発を行う。そのうち、超臨界地熱発電については、超臨界地熱資源からの熱抽出が可能であることを示すと同時に従来の地熱発電の発電コストと同等であることを示すこと。	実現可能性調査として、超臨界地熱発電の工学的・経済的な実現可能性を調査する必要がある。

II.2 事業の計画内容

II.2.1 研究開発の内容

II.2.1.1 事業全体の研究開発の内容

本事業では、約半数の事業が「(4) 地熱発電の導入拡大に資する革新的技術開発」に分類されており、目標はテーマごとに設定されているが、その内容については、前述の「II.1 事業の目標」に示した、基本計画における研究開発項目(1)～(3)のいずれかに整理が可能であり、本中間評価に際し、以下の通り研究目標毎に再整理を行った。

「超臨界地熱発電の実現可能性調査」に関しては「(4)地熱発電の導入拡大に資する革新的技術開発」のままとした。

※印のテーマは「(4)「地熱発電の導入拡大に資する革新的技術開発」にて実施したテーマ

(1)環境配慮型高機能地熱発電システムの機器開発

〔研究目標〕地熱発電システムの熱効率を20%以上に向上させる技術の確立

- (1.1) 地熱複合サイクル発電システムの開発
- (1.2) 地熱発電適用地域拡大のためのハイブリッド熱源高効率発電技術の開発 ※

(2)低温域の地熱資源有効活用のための小型バイナリー発電システムの開発

〔研究目標〕バイナリー発電のシステム効率を7%以上に資するシステムの確立

- (2.1) 無給油型スクロール膨張機を用いた高効率小型バイナリー発電システムの実用化
- (2.2) 温泉の蒸気と温水を有効活用し、腐食・スケール対策を施したハイブリッド型小規模発電システムの開発
- (2.3) スケール対策を施した高効率温泉熱バイナリー発電システムの研究開発
- (2.4) 水を作動媒体とする小型バイナリー発電の研究開発
- (2.5) 事業採算性と環境保全を考慮したバイナリー発電システムに供するタービン発電機の開発設計 ※

〔研究目標〕スケール対策、腐食対策に係る技術の確立

- (2.6) 炭酸カルシウムスケール付着を抑制する鋼の表面改質技術の開発
- (2.7) 低温域の地熱資源有効活用のためのスケール除去技術の開発 ※
- (2.8) 電気分解を応用した地熱発電用スケール除去装置の研究開発 ※
- (2.9) 温泉熱利用発電のためのスケール対策物理処理技術の研究開発 ※
- (2.10) バイナリー式温泉発電所を対象としたメカニカルデスケーリング法の研究開発 ※

〔研究目標〕二次媒体の高性能化に係る技術の確立

- (2.11) 環境負荷と伝熱特性を考慮したバイナリー発電用高性能低沸点流体の開発

(3)発電所の環境保全対策技術等開発

〔研究目標〕ガス漏洩防止技術や拡散シミュレーション技術等の確立

- (3.1) 硫化水素拡散予測シミュレーションモデルの研究開発
- (3.2) 地熱発電所に係る環境アセスメントのための硫化水素拡散予測数値モデルの開発
- (3.3) 温泉と共生した地熱発電のための簡易遠隔温泉モニタリング装置の研究開発
- (3.4) エコロジカル・ランドスケープデザイン手法を活用した設計支援ツールの開発

〔研究目標〕発電所の高度利用に向けた技術（発電能力や利用率の回復・維持・向上のための技術、付加価値増大を実現する技術）等の確立

- (3.5) シード循環法によるシリカスケール防止技術の研究開発
- (3.6) 還元熱水高度利用化技術開発（熱水中のスケール誘因物質の高機能材料化による還元井の延命・バイナリー発電の事業リスク低減）※
- (3.7) 地熱発電プラントのリスク評価・対策手法の研究開発(スケール／腐食等予測・対策管理) ※

(4)地熱発電の導入拡大に資する革新的技術開発

[研究目標] 超臨界地熱資源からの熱抽出が可能であることを示すこと、並びに、従来の地熱発電の発電コストと同等であることを示すこと。

- (4.1) 天然・人工地熱システムを利用した超臨界地熱発電の発電量、経済性および安全性に関する詳細検討
- (4.2) 超臨界地熱場における革新的モニタリング及びシミュレーション技術の詳細検討

II.2.2 研究開発の実施体制

本研究開発は、NEDO が単独ないし複数の企業、大学等の研究機関(原則、本邦の企業等で日本国内に研究開発拠点を有していること。なお、国外の企業等(大学、研究機関を含む)の特別な研究開発能力、研究施設等の活用あるいは国際標準獲得の観点から国外企業等との連携が必要な部分を、国外企業等との連携により実施することができる。) から公募によって研究開発実施者を選定し、委託または共同研究により実施する。

なお、実用化まで長期間を要するハイリスクな「基盤的技術」に対して、産学官の複数事業者が互いのノウハウ等を持ちより協調して実施する研究開発については、原則としてNEDO負担率1/1の委託で実施することとする。

各研究開発項目における実施テーマ名と実施機関および具体的な研究項目については、「V.個別テーマ」にて、テーマ毎に実施体制図として纏める。

(1)環境配慮型高機能地熱発電システムの機器開発

[研究目標] 地熱発電システムの熱効率を20%以上に向上させる技術の確立

(1.1) 地熱複合サイクル発電システムの開発

[共同研究(NEDO負担率：2/3)]

- ・株式会社東芝

(1.2) 地熱発電適用地域拡大のためのハイブリッド熱源高効率発電技術の開発 ※

[委託研究(NEDO負担率：1/1)]

- ・一般財団法人電力中央研究所
- ・国立大学法人富山大学

(2) 低温域の地熱資源有効活用のための小型バイナリー発電システムの開発

[研究目標] バイナリー発電のシステム効率を7%以上に資するシステムの確立

(2.1) 無給油型スクロール膨張機を用いた高効率小型バイナリー発電システムの実用化

[共同研究(NEDO負担率：2/3)]

- ・アネスト岩田株式会社

(2.2) 温泉の蒸気と温水を有効活用し、腐食・スケール対策を施したハイブリッド型小規模発電システムの開発

[共同研究(NEDO負担率：2/3)]

- ・アドバンス理工株式会社 (平成26年12月、アルバック理工株式会社から名称変更)
- ・株式会社馬淵工業所

(2.3) スケール対策を施した高効率温泉熱バイナリー発電システムの研究開発

[共同研究(NEDO負担率：2/3)]

- ・京葉プラントエンジニアリング株式会社

(2.4) 水を作動媒体とする小型バイナリー発電の研究開発

[委託研究(NEDO負担率：1/1)]

- ・一般財団法人エネルギー総合工学研究所
- ・株式会社アーカイブワークス
- ・国立大学法人東京大学

(2.5) 事業採算性と環境保全を考慮したバイナリー発電システムに供するタービン発電機の開発設計※

[共同研究(NEDO負担率：2/3)]

- ・丸和電機株式会社

[研究目標] スケール対策、腐食対策に係る技術の確立

(2.6) 炭酸カルシウムスケール付着を抑制する鋼の表面改質技術の開発

[共同研究(NEDO負担率：2/3)]

- ・国立大学法人東京海洋大学
 - ・株式会社エディット
 - ・国立大学法人横浜国立大学
 - ・国立大学法人長崎大学
- (2.7) 低温域の地熱資源有効活用のためのスケール除去技術の開発 ※
[委託研究(NEDO負担率：1/1)]
- ・国立大学法人大阪大学
 - ・国立研究開発法人産業技術総合研究所
 - ・株式会社超電導機構
- (2.8) 電気分解を応用した地熱発電用スケール除去装置の研究開発 ※
[委託研究(NEDO負担率：1/1)]
- ・イノベーティブ・デザイン&テクノロジー株式会社
 - ・国立大学法人静岡大学
- (2.9) 温泉熱利用発電のためのスケール対策物理処理技術の研究開発 ※
[委託研究(NEDO負担率：1/1)]
- ・国立大学法人東北大学
 - ・東北特殊鋼株式会社
 - ・株式会社テクノラボ
- (2.10) バイナリー式温泉発電所を対象としたメカニカルデスケーリング法の研究開発 ※
[委託研究(NEDO負担率：1/1)]
- ・国立大学法人秋田大学
 - ・株式会社管通
 - ・国立大学法人東北大学
 - ・国立大学法人東京海洋大学

[研究目標] 二次媒体の高性能化に係る技術の確立

- (2.11) 環境負荷と伝熱特性を考慮したバイナリー発電用高性能低沸点流体の開発
[委託研究(NEDO負担率：1/1)]
- ・国立大学法人東京大学
 - ・旭硝子株式会社

(3) 発電所の環境保全対策技術等開発

[研究目標] ガス漏洩防止技術や拡散シミュレーション技術等の確立

- (3.1) 硫化水素拡散予測シミュレーションモデルの研究開発
[委託研究(NEDO負担率：1/1)]
- ・日揮株式会社
 - ・学校法人明星大学
- (3.2) 地熱発電所に係る環境アセスメントのための硫化水素拡散予測数値モデルの開発
[共同研究(NEDO負担率：2/3)]
- ・一般財団法人電力中央研究所
- (3.3) 温泉と共生した地熱発電のための簡易遠隔温泉モニタリング装置の研究開発
[委託研究(NEDO負担率：1/1)]
- ・国立研究開発法人産業技術総合研究所
 - ・地熱エンジニアリング株式会社
 - ・横河電機株式会社
- (3.4) エコロジカル・ランドスケープデザイン手法を活用した設計支援ツールの開発
[委託研究(NEDO負担率：1/1)]
- ・清水建設株式会社
 - ・株式会社風景デザイン研究所
 - ・学校法人法政大学

[研究目標] 発電所の高度利用に向けた技術（発電能力や利用率の回復・維持・向上のための技術、付加価値増大を実現する技術）等の確立

(3.5) シード循環法によるシリカスケール防止技術の研究開発

[委託研究(NEDO負担率：1/1)]

- ・ 国立大学法人富山大学
- ・ 国立大学法人九州大学
- ・ 三菱マテリアルテクノ株式会社

(3.6) 還元熱水高度利用化技術開発（熱水中のスケール誘因物質の高機能材料化による還元井の延命・バイナリー発電の事業リスク低減） ※

[委託研究(NEDO負担率：1/1)]

- ・ 地熱技術開発株式会社
- ・ 北九州市立大学
- ・ 日揮株式会社

(3.7) 地熱発電プラントのリスク評価・対策手法の研究開発(スケール/腐食等予測・対策管理) ※

[委託研究(NEDO負担率：1/1)]

- ・ 地熱技術開発株式会社
- ・ 国立研究開発法人産業技術総合研究所
- ・ エヌケーケーシームレス鋼管株式会社

(4) 地熱発電の導入拡大に資する革新的技術開発

[研究目標] 超臨界地熱資源からの熱抽出が可能であることを示すこと、並びに、従来の地熱発電の発電コストと同等であることを示すこと。

(4.1) 天然・人工地熱システムを利用した超臨界地熱発電の発電量、経済性および安全性に関する詳細検討

[委託研究(NEDO負担率：1/1)]

- ・ 国立研究開発法人産業技術総合研究所
- ・ 国立大学法人東北大学
- ・ 国立大学法人秋田大学
- ・ 国立大学法人九州大学
- ・ 地熱エンジニアリング株式会社
- ・ 地熱技術開発株式会社
- ・ 帝石削井工業株式会社
- ・ 株式会社テルナイト
- ・ 富士電機株式会社
- ・ 株式会社リナジス
- ・ A G Cセラミックス株式会社
- ・ 金属技研株式会社

(4.2) 超臨界地熱場における革新的モニタリング及びシミュレーション技術の詳細検討

[委託研究(NEDO負担率：1/1)]

- ・ 一般財団法人エンジニアリング協会
- ・ 国立大学法人京都大学
- ・ 伊藤忠テクノソリューションズ株式会社

II.2.3 研究開発の運営管理

研究開発全体の管理・執行に責任を有するNEDOは、経済産業省及び研究開発実施者と密接な関係を維持しつつ、プログラムの目的及び目標、並びに本研究開発の目的及び目標に照らして適切な運営管理を実施する。具体的には、必要に応じて設置される技術検討委員会等における外部有識者の意見を運営管理に反映させる。

開発項目の着実な実施と確実な達成に向け、適時、技術委員会(含、実証現地開催)を開催し、NEDOおよび実施者で実施内容や目標設定を修正、検討する会議を設けている。

なお、個別テーマ毎の運営管理については、「V.個別テーマについて」に記述する。

(知的財産権等の取り扱い)

開発成果に対する取り扱いとして、委託事業の成果に関わる知的財産権等については原則として、すべて実施機関に帰属させることとする(「国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構新エネルギー・産業技術業務方法書」第25条の規定等)。

実施機関においては、我が国の産業競争力の強化に資するべく、開発した技術や成果の特徴を踏まえた知的財産マネジメントを実施する。

知的財産マネジメントとして、例えば、技術成果の公開や権利化を通して、地熱発電技術を普及させるためのマネジメントや、開発技術や研究成果をオープンソースとして公開し技術の普及や浸透を目指すマネジメントなど、各実施機関のマネジメント戦略に基づく取り扱いを行う。

II.2.4 研究開発成果の実用化・事業化に向けたマネジメントの妥当性

研究開発全体の管理・執行に責任を有するNEDOは、経済産業省および各研究開発実施者と密接な関係を維持しつつ、本事業の目的および目標に照らして適切な運営管理を実施した。具体的には、外部有識者による技術検討委員会の設置を要請し、開発内容について審議し、その意見を運営管理に反映させる他、進捗について報告を受けること等を行った。技術検討委員会には、政策上の意向も反映するために経済産業省にもオブザーバーとして参加して頂いた。

実用化・事業化に向けたマネジメントとしては、環境アセスメントで義務付けられている硫化水素拡散予測について、従来の風洞実験による手法の代替として、数値シミュレーションによる手法を開発し（平成25～27年度）、事業終了後には、環境影響評価書の改訂による同技術が実用化されるに至った（平成29年5月）。

一方、地熱業界で環境保全対策に係る事件（国立公園特別地域での指定植物の誤伐採）が発覚したのを受け、環境保全対策技術として成果が上がっている案件（エコロジカル・ランドスケープデザイン手法を活用した設計支援ツールの開発）について、日本地熱協会やMETI地熱研究会へ紹介を行った（平成30年2～3月）。その後、発電事業者から個別の引き合いを受け、委託先とともに詳細説明を実施した。

II.3 情勢変化への対応

平成26年4月に閣議決定されたエネルギー基本計画においても地熱発電は、発電コストも低く、安定的に発電を行うことが可能なベースロード電源を担うエネルギー源として位置づけられていおり、重要なテーマであるとの認識のもと、平成27年度には追加公募を実施した。

平成28年4月に策定された「エネルギー・環境イノベーション戦略」において、温室効果ガス排出量を削減するポテンシャルが大きい、有望な革新的技術として地下の超高温・超高压の状態（超臨界状態）にある水を利用する地熱発電（以下、超臨界地熱発電）が挙げられた。こうした政府の政策を受け、平成29年度には、「超臨界地熱発電の実現可能性調査」が実施した。この案件は、次世代に向けた取り組みのため、平成30年度以降は、地熱発電技術研究開発から独立させ、「超臨界地熱発電技術研究開発」というテーマで継続することとなった。

本プロジェクトは、当初は、平成25年度から29年度の5か年計画で進めていたところ、環境保全対策技術について重要度が増したことや、最近注目されているIoT・AI技術等を適用した地熱エネルギーの高度利用化技術を開始する等の理由により、さらに3か年延長（終了は平成32年度）することとした。

II.4 評価に関する事項

技術的及び政策的観点から、研究開発の意義、目標達成度、成果の技術的意義並びに将来の産業への波及効果等について、外部有識者による研究開発の事後評価を平成33年度に実施する。

III. 研究開発成果について

III.1 事業全体の成果

III.1.1 研究開発項目毎の成果

(1)環境配慮型高機能地熱発電システムの機器開発

研究開発項目①環境配慮型高機能地熱発電システムの機器開発の最終目標に対する成果と達成度を表Ⅲ. 1. 1-1に示す。

表Ⅲ. 1. 1-1 最終目標の達成度

最終目標	成果	達成度	今後の課題
地熱発電システムの熱効率を20%以上に向上させる技術を確立する。	<ul style="list-style-type: none"> ・(1.1) 複合サイクル発電システムにて熱効率20%以上のシステム設計技術を確立。 しかし、実証試験の候補なく未実施となり、事業終了となった。 ・(1.2) ハイブリッドシステムでは、熱効率20%を確認し、地熱とバイオマスのそれぞれ独立したシステムよりも、発電電力量は高く、発電コストも低減化できることが判明。 	<p>△×1</p> <p>○×1</p>	(1.1) 実証試験候補地の選定（未利用坑井の活用等）

◎大きく上回って達成、○達成、△一部達成、×未達

(2)低温域の地熱資源有効活用のための小型バイナリー発電システムの開発

研究開発項目②低温域の地熱資源有効活用のための小型バイナリー発電システムの開発の最終目標に対する成果と達成度を表Ⅲ. 1. 1-2に示す。

表Ⅲ. 1. 1-2 最終目標の達成度

最終目標	成果	達成度	今後の課題
未利用の温泉熱を利用した低温域のバイナリー発電について、熱効率7%以上に資するシステムを確立する。	<ul style="list-style-type: none"> ・複数のバイナリーシステムが提案され、熱効率7.8%のタービン発電機設計技術や、温泉水から低圧蒸気を発生させスケールを除去するバイナリー発電システムによる熱効率8.7%などが実証できた。 	<p>○×2</p> <p>△×3</p>	(2.1) (2.2) 必要な温熱温度や蒸気量などの条件を満足するサイトの選択が重要
スケール対策、腐食対策に係る技術を確立する。	<ul style="list-style-type: none"> ・スケール対策では、源泉を止めずに付着したスケールを除去するデスケリング技術や、薬品を使用せずスケール付着抑制させる電気分解処理技術や電磁+超音波処理技術、上流でスケール濃度を低減させる磁気分離技術などを確立した。 	<p>○×3</p> <p>△×2</p>	(2.6) 複数のスケール成分に対応した対策の構築
二次媒体の高性能化に係る技術を確立する。	<ul style="list-style-type: none"> ・高性能低沸点作動流体の構造設計手法、合成手法、物性値評価による選定に係る技術を確立した。 	<p>○×1</p>	

◎大きく上回って達成、○達成、△一部達成、×未達

(3)発電所の環境保全対策技術等開発

研究開発項目③発電所の環境保全対策技術等開発の最終目標に対する成果と達成度を表Ⅲ. 1. 1-3に示す。

表Ⅲ. 1. 1-3 最終目標の達成度

最終目標	成果	達成度	今後の課題
ガス漏洩防止技術や拡散シミュレーション技術等を確立する。	<ul style="list-style-type: none"> ・風洞実験の代替となる硫化水素の拡散シミュレーションを開発し、高精度な濃度予測とともに開発費・開発期間の半減が実現できた。 ・ステークホルダーとの合意形成に利用できるエコロジカル・ランドスケープ手法、(3.4) 温泉地との共生に有効な簡易遠隔温泉モニタリング装置などのツールを構築できた。 	<p>○×2</p> <p>△×2</p>	(3.1) 拡散予測の精度向上（追加モデル）が課題
発電所の高度利用に向けた技術（発電能力や利用率の回復・維持・向上のための技術、付加価値増大を実現する技術）等を確立する。	<ul style="list-style-type: none"> ・還元熱水中のスケール成分の高い回収効率と品質が実現できた。 ・運用向上を図った地熱発電プラントのリスク評価・対策手法などの技術を確立できた。 	<p>○×2</p> <p>△×1</p>	(3.5) シリカ産廃処理費を削減する追加策が必要

◎大きく上回って達成、○達成、△一部達成、×未達

(4)地熱発電の導入拡大に資する革新的技術開発

研究開発項目④地熱発電所の導入拡大に資する革新的技術開発の最終目標に対する成果と達成度を表Ⅲ. 1. 1-4に示す。

表Ⅲ. 1. 1-4 最終目標の達成度

最終目標	成果	達成度	今後の課題
超臨界地熱資源からの熱抽出が可能であることを示すこと、並びに、従来の地熱発電の発電コストと同等であることを示すこと。	1 坑井あたり 27～45MW、貯留層あたり 100MW 以上の発電が可能な開発モデルを構築した。また、現実的な条件を仮定したところ、現在の地熱発電所の発電コストと同等であることを確認した (9.8～12.6 円/kWh)。	<p>○×1</p> <p>△×1</p>	地上設備の設計が不十分の箇所（シリカ対策、腐食対策等）があり、さらに 2 か年継続調査を行うことで技術課題の解決と経済性の再評価を実施する。

◎大きく上回って達成、○達成、△一部達成、×未達

Ⅲ.1.2 知的財産等の取得、成果の普及

成果の普及については、NEDOは、技術情報流出に配慮しつつ、実用化・事業化を推進するため、情報発信を行うように指導している。事業全体の特許、論文、外部発表等の件数を表Ⅲ-3に示す。

NEDO自身も、学会・シンポジウムでの講演、専門誌への寄稿等を行っている。

表Ⅲ.1.2-1 事業全体の特許、論文、外部発表等

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表		
	国内	外国	PCT※ 出願	査読 付き	その 他	学会発表・ 講演	新聞・雑誌等 への掲載	その他
H25FY	1件	0件	0件	0件	0件	3件	0件	0件
H26FY	3件	0件	0件	2件	1件	33件	2件	14件
H27FY	5件	0件	0件	8件	1件	41件	3件	7件
H28FY	4件	0件	0件	8件	2件	40件	4件	5件
H29FY	3件	0件	0件	9件	0件	40件	6件	8件
合計	16件	0件	0件	27件	4件	157件	15件	34件

(※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約)

平成30年5月31日現在。

NEDO 成果報告会発表および、NEDO 自身の件数は含まない。

Ⅲ.1.3 個別テーマ毎の成果(まとめ)

(1) 環境配慮型高機能地熱発電システムの機器開発

【研究目標】 地熱発電システムの熱効率を 20%以上に向上させる技術の確立

表Ⅲ.1.3-1 個別テーマの目標と成果(最終目標に対する成果)

※達成度[◎：目標を大幅に上回って達成、○：達成、△：一部達成、×：未達]

(1.1) 地熱複合サイクル発電システムの開発				
開発項目	最終目標[H25年度]	成果	達成度	目標達成のために解決すべき課題
①環境を考慮した低沸点媒体の選定	・複合サイクルシステムに適する低沸点媒体の検討、および選定を行う。	・複合サイクルに適する低沸点媒体を選定した。	○	
②選定された低沸点媒体に対する複合サイクル最適化の検討	・最適ヒートバランスを元にした複合サイクルが単独バイナリー方式・フラッシュ方式に対して優位となる井戸条件を推測する。	・熱効率 20%へ到達する複合サイクルのヒートバランスを構築した。他の発電方式と比較し、優位となる条件を推測した。	○	
③選定された低沸点媒体の特性に適したバイナリータービンの開発・設計	・バイナリータービン計画図を作成する。	・構築したヒートバランスに基づき、バイナリータービンの通路部性能を検討し、軸シールシステム設計を行った。それら結果を元にバイナリータービン計画図を作成した。	○	
④選定された低沸点媒体に対する各種熱交換器の開発・設計	・ヒートバランスを元にした各種熱交換器を計画する。	・構築したヒートバランスに従って、選定した低沸点媒体の特性に応じた各種熱交換器を計画した。	○	
⑤地熱熱水によるスケール抑制技術の開発	・スケール付着抑制のための薬剤選定、注入条件の検討	・地熱熱水の調査を行い、スケール生成能を検討した。また2種のスケール抑制手法を検討した結果、カルシウム結合剤とシリカ分散剤を用いる手法を選定し、それら薬剤添加によるスケール抑制効果が確認できた。	○	
⑥複合サイクル発電の実証試験	・実証井戸の探索 ・効率 20%以上を目標としたMW級複合サイクルの実証	・有識者協議会をH27年4-7月に開催の上、実証試験未実施で契約を完了する事を決定した。有識者協議会をH27年4-7月に開催の上、実証試験未実施で契約を完了する事を決定した。	-	
(1.2) 地熱発電適用地域拡大のためのハイブリッド熱源高効率発電技術の開発				
開発項目	最終目標[H29年度]	成果	達成度	目標達成のために解決すべき課題
①ハイブリッド熱源発電システムの成立性評価 ②ハイブリッド熱源発電システムの実運転条件の検討	・地熱発電システムとして、発電効率が20%以上となるシステムを開発する。 ・外部熱源の調達も含めて、事業性が成立する可能性があるハイブリッド熱源発電システムを開発する。	・従来の地熱発電システムに蒸気過熱器を設置し、タービンに流入する前の地熱飽和蒸気を外部熱源(600℃)により約400℃まで過熱することによって、地熱発電システムとしての発電効率が20%を上回り、発電出力が約3割増加する(冬期条件)ことを示した。 ・ハイブリッド熱源発電システムの概念設計を実施し、地熱発電所とバイオマス専焼発電所とを別々に開発した場合と比較したところ、より多くの発電電力量を得ることができ、且つ設備コストを低く抑えられることが分かった。 ・日本国内の設備容量が9MWeまでの地熱発電システムとのハイブリッド化にはバイオマスが外部熱源として有望であることが分かった。 ・国内3地域を対象としたバイオマスのポテンシャル調査に基づき、ハイブリッド熱源発電システムの発電原価を試算したところ、いずれの地域においても25~30円/kWh程度と、“間伐材等由来の木質バイオマス”のFIT価格(40円/kWh)を下回ることが分かった。	○	

③スケールセンサーの開発	<ul style="list-style-type: none"> 光ファイバーセンサーによるスケール付着への連続的な光応答を得る。 スケールの付着量や沈殿速度とセンサー応答の関係を明らかにする。 蒸気過熱器での実証試験を行う際にセンサーによってスケール付着状況を観測する。 	<ul style="list-style-type: none"> 光ファイバーのコアをむき出しにしたものをセンサーとして光源と検出器を接続し、スケール付着に伴う屈折率変化を光応答として検出できるスケールセンサーを開発した。 松代温泉および澄川地熱発電所にて、開発したセンサーを地熱流体に暴露する試験を実施したところ、炭酸カルシウムおよびシリカスケールのセンサー表面への析出をセンシングすることに成功した。 	○	
④ハイブリッド熱源高効率発電システムの小規模実証試験	<ul style="list-style-type: none"> スケール付着防止策等を講じることで、“事業性を考慮した期間”連続運転が可能な地熱蒸気過熱器を開発する 	<ul style="list-style-type: none"> 滝上地熱発電所にて、実規模の蒸気過熱器配管1本分に相当する小規模実証試験器を用いた長期暴露加速試験を実施したところ、蒸気過熱に起因するスケール付着や腐食に関する問題は認められなかった。 	○	

(2)低温域の地熱資源有効活用のための小型バイナリー発電システムの開発

【研究目標】バイナリー発電のシステム効率を7%以上に資するシステムの確立

表Ⅲ.1.3-2 個別テーマの目標と成果(最終目標に対する成果)

※達成度[◎：目標を大幅に上回って達成、○：達成、△：一部達成、×：未達]

(2.1) 無給油型スクロール膨張機を用いた高効率小型バイナリー発電システムの実用化				
開発項目	最終目標[H27年度]	成果	達成度	目標達成のために解決すべき課題
①無給油型スクロール膨張機および小型バイナリー発電システムの開発	<ul style="list-style-type: none"> 発電効率7%を達成する コスト面において、11kWの場合に10百万を実現する。 	<ul style="list-style-type: none"> 設計製作したバイナリー発電システムの温熱源80℃の実証試験では熱効率4.3%であったが、温熱源が100℃を超える温泉蒸気や、新媒体の利用、トリプレックスモデルによる高効率化により熱効率7%の達成の見込みを得た。 現時点では装置価格11百万円で提供できる見込み 事業化計画では、コージェネなどへの展開によるマスマリットとシステムのアウトソーシングで投資に伴う減価償却費を無くすことで10百万円が達成できる見込みを得た。 	△	温熱源が100℃を超える温泉蒸気や、新媒体の利用、と熱の2次利用で総合効率を高めることで達成する見通し
②摺動特性を向上するトライボシステムの開発	<ul style="list-style-type: none"> 潤滑油を使用することなく連続30,000時間の運転が可能な駆動部を備える。 シール部において、摩耗量として2.0mm/30,000時間以下となる材料、潤滑機構を達成する。 	<ul style="list-style-type: none"> 製造面も考慮したうえで、目標を満足できる材料を開発した。 材料のスクリーニングが終わり、ラボ評価での可能性を見出した。 	○	
③海外調査と普及促進	<ul style="list-style-type: none"> 海外での市場性を確立し、生産、調達を含めたグローバル化でマスマリットによる品質と性能の向上とコスト低減を図る。 	<ul style="list-style-type: none"> エアコンプレッサ用ドライヤーメーカーなどによってシステム化が容易に可能であり、海外現地でのシステム化が可能となる。 コージェネとの組み合わせにより欧州でのビジネスが可能であり、その結果コアパーツの量産効果によってコスト低減がなされ、日本の地熱発電市場への普及が促進される。 	○	
(2.2) 温泉の蒸気と温水を有効活用し、腐食・スケール対策を施したハイブリッド型小規模発電システムの開発				
開発項目	最終目標[H27年度]	成果	達成度	目標達成のために解決すべき課題
①温水発電システムの腐食・スケール対策を講じた熱交換器の開発	<ul style="list-style-type: none"> 維持管理費の低減、稼働率90%以上を実証する。 	稼働率95%以上を達成	○	
②スクロール型蒸気膨張機による蒸気発電の一次試作	<ul style="list-style-type: none"> ボイラの蒸気において、発電出力1~3kWを達成する。 	最大発電出力1~2kWを達成	○	
③スクロール型蒸気膨張機による発電シ	<ul style="list-style-type: none"> 温泉の蒸気による発電出力1~3kWを達成する。 	ボイラにより最大発電出力4kWを達成(温泉蒸気は蒸気不足により1.2kW止まり)	△	

システムの二次試作				
④ハイブリッド発電システムの実証試験	・温水発電と蒸気発電で発電出力 3 kW~5 kW を達成する	気水分離器製作済 温水発電で発電出力 3.2kW 蒸気発電で発電出力 1.2kW 合計出力 4.4kW 目標である発電出力：3 kW~5 kW を達成	○	
⑤事業性・市場性確保のための検討と開発への反映	①出力特性、初期導入コスト、維持管理コストなどの算出により事業性の検証を行う ②事業性の検証に基づき企業へのインタビューを行い、市場を獲得する上での方向性を示す ③事業性/市場性の検討に基づき今後の開発の方向性を示す	①事業取支の検証の結果、以下を確認した。 ・最大発電量に対する稼働率が 80%以上であれば、システム価格は現状で可 ・最大発電量に対する稼働率が 60%以上であればシステム価格は現状の 50%にする必要あり ②市場を獲得する上で、以下の方向性を確認した。 ・小規模・分散型を特徴とする本システムが高い訴求力を有する可能性あり ・地熱以外の排熱利用を加えての市場想定が必要 ・環境系ファンドが市場獲得の一助となる可能性あり ③開発に対し、以下の方向性を確認した。 ・ローコスト化 ・システムのモジュール化 ・社会的貢献を目指す投資家からの出資	○	
⑥スケール抑制採熱手法と発電量最大化技術開発	熱交換器の稼働率：95%以上 熱効率：7.0 %以上	・熱交換器の稼働率 95%以上を達成、 ・蒸気発電の送電端出力に対する発電効率は 2.6% (実証試験において)、3.3% (実験室内) であり、目標未達 温水発電の発電効率は 5.3~6.3%を達成 (12月~1月の真冬の実証試験において) 両者ともにも目標である発電効率は未達。	△	蒸気発電は温泉地での蒸気量確保が困難であったが、他の蒸気への技術利用可能。 温泉発電はコストダウンが課題。

(2.3) スケール対策を施した高効率温泉熱バイナリー発電システムの研究開発

開発項目	最終目標[H28年度]	成果	達成度	目標達成のために解決すべき課題
①スケール除去フラッシュタンク開発	・100℃温泉水を低圧 58kPa 程度で 85℃蒸気を抽出し、スケール除去を可能にする。	・目標圧力・温度を得ることができた	○	
②高効率蒸気/冷媒熱交換器開発	・蒸気の凝縮温度と冷媒の蒸発温度の差が 5℃以下、熱貫流率 1.7 kW/m2K 以上の維持を可能にする。	・蒸気の凝縮温度と冷媒の蒸発温度の差は 3.02℃であった ・熱貫流率に変化は見られなかった。	○	
③低圧蒸気制御システム開発	・30分以内に 58kPa 程度に減圧して運転を可能にする。	・10分ほどで 58kPa の圧力を得られた	○	
④蒸発式凝縮器 (コンパクトエバコン) の開発	・冷媒保有量を従来比 1/1 以下、凝縮温度を冷却水温度+3℃以下とする。 ・アルミプレートフィンを使用した熱交換器の実績値から 3℃を目標値とした。	・冷媒保有水量は従来比 1/10 以下を達成 ・凝縮温度は冷却水温度+2.5℃だった	○	
⑤機器性能試験および温泉井戸における位総合性能試験	発電効率(発電出力値-補機消費電力)/投入熱量)：7%以上	・発電効率は 8.7%を得ることができた	○	

(2.4) 水を作動媒体とする小型バイナリー発電の研究開発

開発項目	最終目標[H29年度]	成果	達成度	目標達成のために解決すべき課題
①全体システムの設計・開発	・システムの基本仕様の決定、基本設計の実施 ・送電端効率向上の方策検討 ・実証システムコスト、採算性の評価	・温水、冷却水の温度・流量と日・季節変動を考慮したシミュレーションにより、基本仕様を決定した。温排水、温泉水実証設備の基本設計を実施した。 ・様々な温泉水、冷却水供給方法を検討し、適切な供給方法および機器を選定した。機器配置の最適化や省エネ対策 (インバータなど) により、送電端効率向上の方策を検討した。 ・目標とする出力 (20kW) での運転試験と長期試験が未実施のため、実測データによる評価は出来なかった	○	

		が、現状で取得済みの実測データと、今後得られる運転データの予測値をもとにコスト試算、採算性を評価した。		
②発電装置の開発	<ul style="list-style-type: none"> 各要素技術の開発とそれらを組み込んだ発電機的设计・試作 各要素技術の改良・最適化と実証試験機への反映 新型高効率熱交換器の開発と発電装置への組み込み 量産化に適し、メンテナンス性に優れた発電装置の製作 	<ul style="list-style-type: none"> ツインエントリタービン、水潤滑軸受、可変ノズル機構などの各要素技術の解析・開発を行い、それらを組み込んだ発電機的设计・試作を行った。 試運転により得られた知見をもとに各要素技術の改良と最適化を実施し、それを反映した発電装置を製作した。 新型高効率熱交換器の試作を完了した。発電装置への組み込んだ試験は、他の課題対応に追われ未実施。 量産化、メンテナンス性を考慮し、随時改良を加え、実証試験に反映させた。 	△	開発遅延リスクを踏まえた適切な工程管理
③熱交換器の高性能化の研究	<ul style="list-style-type: none"> 数理モデルの構築とシミュレーションコードの開発 高効率伝熱面形状の提案、試作および検証 現状の平滑な伝熱面に対して2.5倍の熱伝達率を実現 	<ul style="list-style-type: none"> 数理モデルを構築し、シミュレーションコードを開発した。 シミュレーションと流路形状最適化を実施した。伝熱面形状の試作と、流れ場計測による検証を実施した。プレスの制約条件を考慮した伝熱面を提案し、試作した。発電機に組み込んだ試験は未実施。 平滑な伝熱面に対して熱伝達率が5~6倍程度向上する伝熱面を提案した。 	○	
④フィールドテスト	<ul style="list-style-type: none"> 実証サイトの選定、温泉水・冷却水の供給条件などの調査 システム構成、工事計画の策定、設置工事実施 温泉水温度85℃以下、冷却水温度15℃で送電端効率7%以上 温泉水65℃で送電出力 長時間運転試験の安定性、耐久性、メンテナンス性、スケールの影響の評価 	<ul style="list-style-type: none"> 各温泉地の条件調査、視察を行い、TIF（温排水）、つなぎ温泉（温泉水）を実証サイトとして選定し、温泉水・冷却水の供給条件を詳細に調査した。 上記調査をもとに適切なシステム構成、工事計画を策定し設置工事を実施した。 3~6kW程度の出力で長時間安定運転可能な実績を得たが、目標出力の20kWには至らなかった。 蒸発器へ入る温水の温度が65℃となるよう条件を設定して試験し、0.9kW程度の出力を得た。 長時間運転ができず、関連する安定性、耐久性、メンテナンス性、スケールの影響の評価はできなかったが、これまでの不具合改良対応などから、耐久性やメンテナンス性に関して一定の知見は得られた。 	△	想定出力での長期運転が出来ず、原因抽出と対策が課題。

(2.5) 事業採算性と環境保全を考慮したバイナリー発電システムに供するタービン発電機の開発設計

開発項目	最終目標[H29年度]	成果	達成度	目標達成のために解決すべき課題
①タービン発電機の検討	環境保全型作動媒体を用いた高効率タービン発電機の構築	・ハイドロフルオロオレフィンを作動媒体にした発電システムの解析を完了した。	○	
②断熱効率達成の可能性検討	・断熱効率86%以上の遠心式タービンの構築	・断熱効率86%以上の遠心式タービンの基本設計を完了した。	○	
③発電機本体の設計	・各種モータ冷却（水冷または媒体冷却）方式のタービン発電機の構築	・水冷方式と媒体冷却方式のタービン発電機の基本設計を完了した。	○	
④磁気軸受搭載回転体設計	・高耐久性高速回転体の最適構造の構築	・磁気軸受け搭載の高速回転体の最適構造の基本設計を完了した。	○	
⑤タービンの設計	・最大断熱効率を得るタービン形状の構築 ・発電効率：7%以上	・CFD解析により、夏季、中間期、冬季の各々の作動条件で、最高効率を達成できるタービン翼形状を設計し、タービン断熱効率=90%達成した。 ・年間システム効率（発電端）は7.8%で目標を達成できる可能性を得た。	○	
⑥タービン発電機詳細設計	・上記目標を達成するタービン発電機の構築	・詳細設計図を完成した。	○	
⑦実用化・事業化検証	・タービン発電機のコストの算定	・4~5年での初期投資回収が可能な試算を得た。	○	

〔研究目標〕スケール対策、腐食対策に係る技術の確立

表Ⅲ.1.3-3 個別テーマの目標と成果(最終目標に対する成果)

※達成度[◎：目標を大幅に上回って達成、○：達成、△：一部達成、×：未達]

(2.6) 炭酸カルシウムスケール付着を抑制する鋼の表面改質技術の開発				
開発項目	最終目標[H27年度]	成果	達成度	目標達成のために解決すべき課題
①スケール付着箇所の把握と付着条件の検討	・スケール付着因子を整理する。	・長崎県雲仙市小浜温泉におけるスケールメンテナンス頻度とスケール付着因子をまとめた。	○	
②スケール形成機構のモデル化	・実験室および実地環境においてスケール付着機構を明らかにする。	・スケール形成過程をモデル化した。	○	
③スケールと伝熱性能の関係性評価	・スケール付着が伝熱性能へ及ぼす影響を評価する。	・熱交換器に付着したスケールの詳細解析、スケール付着速度、スケール付着と伝熱性能について評価した。	○	
④表面改質材の開発およびスケール抑制機構のモデル化	・スケール付着加速試験を用いて、スケール付着量を従来材比で75%削減する材料を作製する。	・実験室環境で、スケール付着量を80%低減する材料を開発した。	○	
⑤表面改質材の実地試験およびその伝熱性能評価	・実地環境において開発材を試験する。そのスケール付着状態を評価し、従来材と比較する。また、開発材の特性を評価解析する。	・耐スケール効果を有する開発材を用いて実地試験し、スケール付着量に変化が見られなかった。その要因を炭酸カルシウムスケール形成前の初期に付着したシリカ系スケールの影響であることを特定した。	△	初期のシリカ系スケールの付着抑制に焦点を絞った材料の探索と実証が必要
⑥スケール付着面からの最適運転方法の提案	・実際の温泉発電プラントの環境にてメンテナンスが必要となるまでの運転期間を現在の使用材料の現況と比較して1.5倍以上に延長するシステムを提案する。	・実際の温泉発電プラントの環境にてメンテナンスが必要となるまでの運転期間を現在の使用材料の現況と比較して1.5倍以上に延長する材料の設計指針とそのシステムを提案した。	○	
(2.7) 低温域の地熱資源有効活用のためのスケール除去技術の開発				
開発項目	最終目標[H27年度]	成果	達成度	目標達成のために解決すべき課題
①市場調査	・シリカ除去対策用磁気分離装置の必要性についてまとめる	・バイナリー発電施設の導入の際には、熱交換器の熱水が流入する前工程でシリカが除去出来るシステムに対するニーズがあることが確認された。	○	
②地熱水シリカ対策用磁気分離装置の概念設計	・地熱水シリカ対策用磁気分離装置の概念設計を行う	・地熱水シリカ対策用磁気分離装置は、磁気シーディング工程と磁気分離工程の2工程を必要とし、2つの装置構成で概念設計をした。	○	
③モデル装置試作試験	・地熱水シリカ対策用モデル装置試作試験	・概念設計を基に試作した地熱水シリカ対策用磁気分離装置を温泉サイト（小浜）で試験を実施し、適用可能なことを示した。	○	
④磁気力制御を利用したシリカ分離、基礎実験装置作製と試験	・磁気力制御を利用したシリカ分離基礎実験装置作製と試験	・薬剤および濃度の決定後装置試作を実施した。	○	
⑤磁気分離システムの設計・検討	・開発項目④で得られた結果を基に小規模な磁気分離システムを試作し実温泉水を用いて磁気分離試験を行う	・試作機により地熱水中のシリカ（小浜温泉）を除去できることを確認した。連続処理には薬液注入システムの自動化および捕捉した磁性フロックの系外への連続的な排出が必要なことが確認された。	○	
⑥温泉資源の調査と含まれるスケール成分の分析	・温泉発電の可能性のある地域の温度80℃以上の温泉水を採取しシリカ濃度等の化学分析を行う	・現地調査結果に基づきシリカスケール発生の可能性がある地域を抽出した。	○	
⑦磁場設計、流体設計、フィルター設計	・開発項目④⑤で調製された磁性フロックを磁気分離するための磁気力算出、および磁場設計	・磁場解析・流体解析および粒子軌跡計算により磁気フィルター・磁場強度を決定した。	○	

⑧5 t/h 磁気分離装置設計試作/運転・試験	<ul style="list-style-type: none"> 開発項目②～⑥の結果を受けて、5t/h 用に最適な磁気分離装置を設計・試作する 製作した磁気分離システムで現地試験の実施する 	<ul style="list-style-type: none"> 5t/h 用に最適な磁気分離装置を設計・試作した。 湯布院（シリカ濃度 450ppm）で現地試験を実施し、小規模試験に比べ薬剤添加量に対するシリカ除去率が低下した。処理量の増大により、薬剤添加速度やかしくはんによる薬剤反応速度の遅れや pH 制御の改善など、また、かしくはん速度・かしくはん翼の大きさなどが問題点として抽出された。 	○	
⑨30 t/h 磁気分離装置設計試作・検討	<ul style="list-style-type: none"> 実用化に向けて処理量の増大 30 t/h を図り（10t/h×3 台）磁気分離装置設計後、装置構成や配置の検討を行う 	<ul style="list-style-type: none"> 小容量のシステムであれば余剰の温泉水量が少ない温泉にも適用でき、本システムの適合地が多くなるため、⑫のシステムを元に、様々な容量に対応可能な小さいシステム（具体的には10t/hのシステム）を複数台設置して10t/hを3台設置し運用することとし、実用機設計を行った。 	○	
⑩1 t/h 磁気分離装置の設計試作/連続運転・試験	<ul style="list-style-type: none"> 連続処理型 1t/h 磁気分離システムを設計・試作する 磁気分離装置の試験候補地の選定、試験に必要な薬剤量を算定後、試作した 1t/h 磁気分離システムの連続運転試験を行う 	<ul style="list-style-type: none"> 地熱水シリカ対策用磁気分離システムは磁気シーディング装置、粗取り用磁気分離装置、精密磁気分離装置から構成した。連続運転を行うため、磁気シーディング装置と粗取り用磁気分離装置を新たに設計試作した。 精密磁気分離装置を通過したシリカ濃度（処理後 5ppm 以下、シリカ除去率 95%）は連続して低減され続け、安定してシリカを分離可能なシステムであることが確認された。 	○	
⑪地熱水シリカ対策用磁気分離システム評価	<ul style="list-style-type: none"> 実用化に必要な目標値や課題を抽出する 	<ul style="list-style-type: none"> シリカ含量が 200ppm 程度の場合にはランニングコストの上でも適用可能であることが示された。また、温泉水の化学分析結果を基に磁気分離システムが低減すべきシリカ濃度の目標値を明確にした。 	○	
⑫実用機設計、全体システム設計	<ul style="list-style-type: none"> 10t/h の実用機設計とそれに付随する全体システム設計を行う 	<ul style="list-style-type: none"> 小容量のシステムであれば余剰の温泉水量が少ない温泉にも適用でき、本システムの適合地が多くなるため、⑫のシステムを元に、様々な容量に対応可能な小さいシステム（具体的には10t/hのシステム）を複数台設置して10t/hを3台設置し運用することとし、実用機設計を行った。 	○	
⑬ビジネスプランの検討	<ul style="list-style-type: none"> 開発項目①、⑥、⑫の調査解析結果をもとに、ビジネスプランを検討する 	<ul style="list-style-type: none"> シリカ含量が 200ppm 程度の場合にはランニングコストの上でも適用可能であることが示された。高濃度（500ppm）についてはさらなる最適化が必要となる。また、文献の温泉の湧出温度と湧出量を参考に期待し得る温泉発電規模を想定した。 	○	

(2.8) 電気分解を応用した地熱発電用スケール除去装置の研究開発

開発項目	最終目標[H29 年度]	成果	達成度	目標達成のために解決すべき課題
①基本条件の調査研究開発	<ul style="list-style-type: none"> 電解スケール除去に必要な情報を調査するとともに、スケール除去の数式モデル妥当性を全国 10 カ所以上で検証する。 	<ul style="list-style-type: none"> 伊豆地区を中心に、温泉水およびスケール析出物を採取し成分分析を行なった。 この分析結果から得たイオン濃度情報をスケール抑制理論モデルに当てはめ、採取した源泉を用いたラボでのマイクロチャンネル実験結果との照合を行った結果、理論モデルの妥当性が確認できた。これによりスケール抑制予測が可能となった。 	○	
②適正な電解条件の検討	<ul style="list-style-type: none"> 小型無隔膜電解装置を用いたラボ実験およびスケール除去実績データから理論モデルを作成し、電気分解による地熱水スケール除去のための電解条件を明確にする。 	<ul style="list-style-type: none"> ラボでの基礎実験により、無隔膜電解で生成した電解水でスケール除去できる要因は、イオン輸送に依る可能性が高いことが明らかとなった。 同時に、マイクロチャンネルを用いたラボ実験を行ない、スケール析出および抑制過程を把握することで、実証試験における、電解条件の目処付けを行なった。 	○	
③温泉水の水質に対応した無隔膜電解装置の開発	<ul style="list-style-type: none"> 耐熱、耐圧仕様の試験用無隔膜電解装置を製作し、地熱水 90℃以上の複数箇所を実証試験を行い、システム性能とコストを見積もる。 	<ul style="list-style-type: none"> 伊豆地区内複数箇所で、炭酸カルシウムスケールに対するスケール除去実証評価を行った。泉温が低くスケール析出が穏やかなサイトにおいては、当初付着している配管スケールを 6 ヶ月間で約 50%削減した。しかし、スケール析出が著しいサイトにおいては、スケール除去効果は得られたが、電解装置内部へのスケール付着による閉塞が確認された。実用化を考慮した場合、装置が大型となり採算面からも実用化が難しいと判断し、H27 年度で開発を終了した。 	△	
④無隔膜電解による生成物質の分析と腐食性物質	<ul style="list-style-type: none"> 地熱水の電気分解により生成される酸化物質を約 30%削減可能なシステムを明確にする。 	<ul style="list-style-type: none"> 基礎実験により、地熱水中に含まれるイオンから生成する酸化性物質を特定し、除去方法について検討を行った。 	○	

の除去方法 の開発				
⑤有隔膜電解による洗浄装置の開発	<ul style="list-style-type: none"> ・実証試験による有隔膜式電解装置のスケール除去または析出防止効果を確認した上で、20kW級温泉バイナリー発電機を想定した実用機相当の有隔膜電解装置の製作を行う。 	<ul style="list-style-type: none"> ・周辺配管および熱交換器への付着抑制効果については、小流量における評価および流量を増量した場合両評価においてスケール付着抑制効果があることが実証出来た。 ・また、20kW程度までの発電に必要な湯量に対するシステム運用条件で試算した結果、既存スケール対策と比較してコスト優位性が期待できる装置仕様の目処付けを完了した。 	○	
⑥バイナリー発電機の熱交換器を対象とした実証試験及びデータ解析	<ul style="list-style-type: none"> ・熱交換器及びその周辺配管に付着するスケールの除去または付着抑制効果がある数kW～20kWまでの温泉バイナリー発電機を想定した有隔膜式電解装置を開発し、既存スケール対策とのコスト優位性を実証する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・周辺配管および熱交換器への付着抑制効果については、小流量における評価および流量を増量した場合両評価においてスケール付着抑制効果があることが実証出来た。 ・また、既存スケール対策(薬剤+機械式)に対するコスト優位性についても、20kW程度までの発電に必要な湯量に対するシステム運用条件で試算した結果コスト優位性が実証出来た。 	○	

(2.9) 温泉熱利用発電のためのスケール対策物理処理技術の研究開発

開発項目	最終目標[H29年度]	成果	達成度	目標達成のために解決すべき課題
①超音波及び高周波電磁処理によるスケール防止効果の確認	<ul style="list-style-type: none"> ・スケール付着防止効果の理論化確立する。 ・国内累計15～20ヶ所程度の温泉地の現地調査並びに水質分析を実施する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・実証試験等データよりスケール付着防止効果と電磁場及び超音波処理の適用範囲を推察した。 ・累計33ヶ所の試験を実施した。 	○	
②超音波及び高周波電磁処理のハイブリッドスケール防止装置の開発	<ul style="list-style-type: none"> ・100A配管に適用し得る、出力:300W以上の高周波電源を開発する。 ・150℃の源泉坑井管内でも運用可能な発振部を開発する。 ・ハイブリッドスケール防止装置の製品仕様を確定する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・出力300WのLC共振回路付電源を開発した。 ・源泉坑井管内に適用できる電磁場発振部及び超音波発振部を開発し、耐熱試験を実施した。 ・製品仕様を確定し、高温対応の実現化できた。 	○	
③ハイブリッドスケール防止装置の実証試験とその運用条件の体系化	<ul style="list-style-type: none"> ・2か所以上で4～6セット程度の実証試験を行う。 ・実証試験によってスケール防止効果を確認し、運用条件を体系化する。 ・導入データ及び現地調査データ(累計500件程度)をデータベース化する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・累計33ヶ所の現地調査を実施した。 ・実証試験(3ヶ所)を実施し運用条件を体系化した。 ・累計650件のデータベースを構築した。 	○	
④データ統合解析	<ul style="list-style-type: none"> ・スケール防止効果の総合評価 	<ul style="list-style-type: none"> ・総合評価を実施し、ハイブリッドスケール防止装置の運用条件を構築した。 	○	
⑤最終目標	<ul style="list-style-type: none"> ・本研究の試験フィールドにおいて、スケール対策の年間運用コストを、従来の浚渫もしくは薬注による対策コストと比較し20%以上低減する ・多様な温泉水に対するデータベースを構築し、ハイブリッドスケール防止装置の運用条件を体系化する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・清里で実施した実証試験の結果、現状の薬注による対策コストと比較して20%以上低減できることを確認した。 ・データベースを構築し、温泉水に対するハイブリッドスケール防止装置の適用範囲を明らかにし、運用条件を体系化できた。 	○	

(2.10) バイナリー式温泉発電所を対象としたメカニカルデスケーリング法の研究開発

開発項目	最終目標[H29年度]	成果	達成度	目標達成のために解決すべき課題
①経済性及び実用化後の波及効果の評価	<ul style="list-style-type: none"> ・従来法および新手法における費用、清掃頻度を検討の上、将来的に発電継続が可能になることを踏まえた経済的導入可能性 	<ul style="list-style-type: none"> ・従来法及び新手法による導入・運用コストの経済性を比較し、新手法は、従来法よりも10%以上コスト削減可能との見込みを得た。 	○	

	を評価し提示する。			
②スケール構造・組成とスケール強度との関係についての検討解析	・スケール及び温泉水の分析ならびにスケールの力学試験結果を基に、鉱物学・結晶学的見地からデスケーリング装置の設計指針を提案する。	・デスケーリング装置開発として、以下の2つについての設計指針を得た。 モニタリング装置 スケール除去装置	○	
③スケール付着計測技術及び装置の開発ならびにスケール除去時期判断手法の開発	・スケール付着状況とスケール除去の効果を非破壊で外部から判断可能な温度測定式モニタリング装置を開発する。	・スケール付着厚さを±10mmの精度で測定可能な手法を開発した。	○	
④スケール除去装置の開発及び評価手法の開発	・平成27年度までに常温で稼働可能なデスケーリング実験装置を開発する。 平成29年度までに源泉を止めずに使用できるデスケーリング技術を開発する。	・デスケール実験やスケール破壊に関する数値シミュレーションから効率的にデスケーリングを行うためのガイドラインを提案した。	○	
⑤スケール除去装置の現場性能確認実験	・設備利用率の向上を加味して従来法より年間の運用コストが20%以上低減できるスケール除去法を開発する。	・50m長の配管に対して、年間運用コストを20%以上低減可能なことを示した。	○	

【研究目標】二次媒体の高性能化に係る技術の確立

表Ⅲ.1.3-4 個別テーマの目標と成果(最終目標に対する成果)

※達成度[◎：目標を大幅に上回って達成、○：達成、△：一部達成、×：未達]

(2.11)環境負荷と伝熱特性を考慮したバイナリー発電用高性能低沸点流体の開発				
開発項目	最終目標[H29年度]	成果	達成度	目標達成のために解決すべき課題
①熱交換器シミュレーションによる流体の熱物性値に対する指針獲得、熱物性値の影響評価、および低沸点流体の燃焼性評価	・低沸点流体の物性値指針獲得 ・基本実験系による熱物性値影響評価 ・燃焼性評価方法の構築	・熱交換器1次元解析により物性値指針を得た。 単管流路実験により詳細な沸騰伝熱特性に対する基礎的知見を獲得した。 ・高速スクリーニングのための燃焼性評価方法を構築した。	○	
②低沸点流体の伝熱性能を評価できるバイナリーシステム・テストベンチ構築	・タービンを組み込んだバイナリー発電システム	・スクロールタービンおよび斜め波状壁熱交換器を組み込んだバイナリー発電システムを構築した。	○	
③数値解析を用いた新しいバイナリー発電用熱交換器構造の検討	・3次元数値解析技術 ・気液相変化を伴う2相流熱流動解析手法 ・新構造の提案	・斜め波状壁熱交換器における沸騰伝熱特性を3次元数値解析により評価した。	○	
④バイナリーシステムを用いた新 작동流体のデータ取得	・新流体の伝熱性能評価 ・既存流体との比較	・種々の低沸点流体に対して発電特性、伝熱特性を評価した。	○	
⑤コンパクトなバイナリー発電システムの提案	・コンパクトシステムの提案	・新コンセプトに基づく高性能熱交換器を提案し、コンパクトシステムの設計指針を得た。	○	

⑥高性能低沸点作動流体の構造設計	<ul style="list-style-type: none"> ・シミュレーション技法拡張 ・高性能作動流体の候補構造の決定 	<ul style="list-style-type: none"> ・バイナリー発電に必要な物性値（沸点、熱伝導度、潜熱など）の推算手法を構築し、分子構造の候補構造13種類を選出した。 	○	
⑦高性能低沸点作動流体の合成	<ul style="list-style-type: none"> ・合成ルート開発 ・要求仕様を満たす新流体の合成 ・評価用の新流体の合成 	<ul style="list-style-type: none"> ・合成可能と確認された構造について、物性値評価および東京大学で実施する評価試験等に用いる試料を合成した。 	○	
⑧高性能低沸点作動流体の物性値評価	<ul style="list-style-type: none"> ・物性値の計測 ・数値目標：沸点 30～50℃程度、ODP ほぼ 0、GWP100以下 ・初期的なじょ限量評価 	<ul style="list-style-type: none"> ・初期毒性評価で低毒性と確認された構造について、その混合物も含めて物性を評価し、要件を満たす最適な物を3種類（混合物含む）選出した。 	○	

(3)発電所の環境保全対策技術等開発

【研究目標】 ガス拡散シミュレーション技術等の確立

表Ⅲ.1.3-5 個別テーマの目標と成果(最終目標に対する成果)

※達成度[◎：目標を大幅に上回って達成、○：達成、△：一部達成、×：未達]

(3.1) 硫化水素拡散予測数値モデルの研究開発				
開発項目	最終目標[H27年度]	成果	達成度	目標達成のために解決すべき課題
①硫化水素の拡散挙動の調査	<ul style="list-style-type: none"> ・硫化水素拡散予測評価を実施する上で考慮する必要のある、硫化水素の拡散挙動に影響する因子を明確化するとともに、拡散予測数値モデル構築に当たり、考慮すべきパラメータ等を明確化する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・国内の地熱発電所等における硫化水素放散に関する環境影響評価等の先行事例の調査等を行い、拡散予測評価シミュレーションモデル構築に当たり考慮すべきパラメータ等を明確化した。 	○	
②硫化水素拡散予測数値モデルの構築	<ul style="list-style-type: none"> ・先行事例の風洞実験結果との比較検討を通じて改善を図り、風洞実験の代替となり得る数値モデルを構築する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・抽出した硫化水素拡散挙動影響因子の影響を踏まえて、拡散予測評価を行うための数値モデルを整備した。 	○	
③硫化水素拡散予測数値モデルの性能評価	<ul style="list-style-type: none"> ・開発する数値モデルが、環境影響評価において風洞実験に代替可能であり、これを用いた予測評価が、風洞実験を用いた予測評価に比べて、効率的かつ効果的であることを検証すること、並びに開発する数値モデルを検証するための適切な風洞実験を実施する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・風洞実験結果と数値モデルによる計算結果の比較評価を実施した。計算による主流方向の速度分布は、複雑な地形にも関わらず、実験結果を比較的良好に再現できた。一方、拡散については、複雑地形が乱流発生に大きく影響して、目標とする評価精度を達成できなかった。 	△	地形形状による乱流発生状況を表現するための、乱流シュミット数を適切に設定する手法などの乱流モデルの開発が必要
(3.2) 地熱発電所に係る環境アセスメントのための硫化水素拡散予測数値モデルの開発				
開発項目	最終目標[H27年度]	成果	達成度	目標達成のために解決すべき課題
硫化水素拡散予測数値モデルの開発	<ul style="list-style-type: none"> ・地熱発電所に係る環境アセスメントにおける排ガス拡散予測評価に必要な期間および費用を半減させるための硫化水素拡散予測数値モデルを開発する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・風洞実験の代替として用いることができる二種類の硫化水素拡散予測数値モデル（簡易予測数値モデル、詳細予測数値モデル）を開発した。 ・簡易予測数値モデルを用いて風洞実験の再現計算を行った結果、排気諸元や建屋・地形、浮力条件を適切に設定することにより、風洞実験で得られた最大着地濃度を概ね良く再現することが可能であり、環境アセスメントの事前検討や配慮書作成等に活用できることが分かった。 ・詳細予測数値モデルを用いて再現計算を行った結果、周辺地形や発電所建屋を精緻に再現することにより、硫化水素の着地濃度および空間濃度を高精度で予測可能であり、風洞実験の代替として環境アセスメントに適用できることが明らかとなった。 	○	

[研究目標] 発電所の高度利用に向けた技術（発電能力や利用率の回復・維持・向上のための技術、付加価値増大を実現する技術）等の確立

表Ⅲ.1.3-5 個別テーマの目標と成果(最終目標に対する成果)

※達成度[◎：目標を大幅に上回って達成、○：達成、△：一部達成、×：未達]

(3.3) 温泉と共生した地熱発電のための簡易遠隔温泉モニタリング装置の研究開発				
開発項目	最終目標[H29年度]	成果	達成度	目標達成のために解決すべき課題
①プロトタイプ の設計	・実証試験に使用可能なプロトタイプを設計する	・当初予定していたスペックを有するプロトタイプを設計した	○	
②プロトタイプ の試作	・実証試験に使用可能な小型化したプロトタイプを試作する	・従来品の計測器を個別に組み合わせたものに比べ、長さで1/5、重量で1/10程度小型化し、事業終了時におけるモニタリング装置の仕様・性能目標を有するプロトタイプを試作した	○	
③プロトタイプ の改良	・プロトタイプを改良し、実証試験に使用可能な性能を持たせる	・必要な改良を施し実証試験に使用可能なプロト対応を実現した	○	
④実証試験	・泉質の異なる複数の温泉地でデータを取得するとともにデータの信頼性、実用性能等について評価する	・国内地熱、温泉地域 11 箇所で大規模 1 年半の実データを収集するとともに、プロトタイプの現地での性能を評価した	○	
⑤実用モデル設計、試作	・製品時の基本的な構成・構造を実現する	・製品時の基本構成の構想に基づいた設計・製作を終了した	○	
⑥自立電源のFS	・温度差発電と PV について、経済性を評価する	・温度差発電装置を試作し、モニタリング試験器の 12 時間以上の連続動作に成功した。 ・温度差発電と PV について、発電量、経済性を評価し、PV と同等以下の価格になる予測を示した。	○	
⑦まとめ（実用化に向けたコストおよびその低減について）	・本装置の実用化時の製造コストならびにコスト低減のための手法を取りまとめる	・本装置の実用化時の製造コストならびにコスト低減のための手法を取りまとめた	○	
(3.4) エコロジカル・ランドスケープデザイン手法を活用した設計支援ツールの開発				
開発項目	最終目標[H29年度]	成果	達成度	目標達成のために解決すべき課題
①エコロジカル・ランドスケープの適用手法の開発	・既存の地熱発電所で実施されている景観構成要素別の自然環境・風致景観配慮手法をパターン化し、地熱開発事業者が活用しやすい成果物(パターン集)として取りまとめる。 ・ケーススタディに適用可能な、自然環境や景観の分析手法(手順、分析内容)を明確化する。 ・ケーススタディの実施により、エコロジカル・ランドスケープの適用手法を明確化する。	・景観構成要素別の自然環境・風致景観配慮手法をパターン化した「配慮手法パターン参考集」を作成した。景観構成要素別の自然環境・風致景観配慮手法をパターン化した「配慮手法パターン参考集」を作成した。 ・自然環境や景観の分析手法を明確化し、ケーススタディを実施。適用手法を明確化した。	○	
②エコロジカル・ランドスケープ支援アプリ開発	・ケーススタディに適用可能なエコロジカル・ランドスケープ支援アプリの試用版を開発する。 ・エコロジカル・ランドスケープ支援アプリを完成させる。	・①で明確化したプロセスの作業を支援するアプリケーションを、一部機能を除き開発した。	△	発電所建設に係る基本計画段階に必要な 1/2500 精度（5mメッシュの等高線地形図）の表示を可能にする等の機能改善が必要。
③自然環境・風致景観への配慮手法のツール化	・自然環境・風致景観への配慮手法に関する参考資料の作成	・①で明確化したプロセスの調査・分析、計画を実施するためのマニュアル「自然環境・風致景観配慮マニュアル」を作成した。	○	

	・①で明確化したプロセスの調査・分析，計画を実施するためのマニュアルの作成			
(3.5) シード循環法によるシリカスケール防止技術の研究開発				
開発項目	最終目標[H29年度]	成果	達成度	目標達成のために解決すべき課題
① 効率的なアルミニウムを取り込んだシリカ除去方法の開発	・シリカとアルミニウムを同時に除去する。	・凝集剤添加によりシリカとアルミニウムを同時除去できた。	○	
② シード循環法を用いた試験用プラントの設計・製作	・効率的な過飽和シリカを除去する試験用プラントの設計・製作する。	・滞留槽をフラッシュャーで兼用する改良を行い、試験プラント製作した。	○	
③ 試験用プラントを用いた連続シリカ除去試験	・凝集剤・生石灰添加による連続試験で最適な除去条件を求める	・連続除去試験では、カチオン系凝集剤添加によるシリカ濃度低減を確認できた。また塩濃度が高い熱水では、添加量が少量ですむことが判明した。生石灰添加試験では、処理水のシリカ濃度は100mg/L以下まで低下し、本手法が有効であることが判明した ・シリカ除去条件も一部ではあるが把握できた。	△	最適な除去条件の決定
④ シリカ除去後の熱水が地熱貯留層へ及ぼす影響の評価	・処理熱水の地下環境へ及ぼす影響評価を把握する。	・処理熱水のカラム通水試験ができなかったが、地熱貯留層内での透水性変化予測シミュレーションでは、還元水中のシリカの挙動を推測できた。	△	通水試験での検証
⑤ 実用化プラント設計・コスト評価	・実用化レベルの熱水処理プラントを設計する。	・実用プラントを設計し、事業コストを試算できた。回収シリカの産廃処理費が経費の60%を占めると試算され、薬剤費および回収シリカ処分費のみのコスト削減では導入効果を得られないことが判明した。	△	バイナリー発電等の2次発電による売電収入や回収されたシリカの工業品化による産廃処理費の削減が必要
(3.6) 還元熱水高度利用化技術開発 (熱水中のスケール誘因物質の高機能材料化による還元井の延命・バイナリー発電の事業リスク低減)				
開発項目	最終目標[H29年度]	成果	達成度	目標達成のために解決すべき課題
① シリカ回収事業の事業性FS	・IRR10%(7年)程度を見通せること	・還元井延命効果なしバイナリーとの併設でIRR10%(7年)以上を達成	○	
② 還元熱水のスケール誘引物質の高機能材料化技術(コロイダルシリカ回収技術の開発)	・平地不足・冷却水調達困難・買電単価が高い・還元井分散などの立地条件への対応	・立体配置・RO膜濾液処理・バイナリーの所内動力への活用・1000 t/d級プラントの設計を実施した。	○	
	・パイロットプラント(熱水100t/d)を製作してシリカ濃度500ppm,1000ppm程度の熱水で実証を行い、コロイダルシリカ(濃度20-40wt,粒径10-20nm)を実サイトで製造	・葛根田の熱水(シリカ濃度460ppm,1,100ppm)から30wt,12nmのコロイダルシリカを生成、利用ユーザーの要求レベル品質を達成した。	○	
	・シリカ回収プロセスとリチウム回収プロセスの共有化によるコスト低減の可能性を示す。 ・地熱コロイダルシリカ回収設備の1,000トン/日と5,000トン/日の還元熱水処理量を持つ設備の概念設計の実施	・シリカ回収後の還元熱水を用いることで、リチウム回収回収効率が5割から9割に向上することが分かった。 ・実規模概念設計を実施し、実用化に必要な技術課題を抽出した。	○	
③ 還元熱水のスケール誘引物質の高機能材料化技術(リチウム回収技術の開発)	・地熱水から飽和吸着時点で吸着材容量10あたり20g吸着可能なリチウム吸着材の開発 ・地熱水からのリチウムの選択的分離濃縮に必要な	・pH8.5の水溶液からのリチウムの飽和吸着量3.67mmo1/g(=25g/L)を達成した。 ・リチウム回収装置を製作し、地熱水からのリチウム回収の実証試験を行い、リチウム回収のコスト試算を実施した。	○	

	吸着分離材・分離回収プロセスの開発と将来の経済的回収への道筋提示			
④還元井延命化効果の推定	・還元井寿命を2倍以上に延命化可能であること、地熱発電所全体の事業性向上が可能であることを示す。	・シリカ回収技術を適用した模擬地層装置による実験で還元井地層へのシリカ付着量が1/5程度に低減したことで還元井は約5倍の延命ができる可能性が示唆された。 ・延命効果によって、30MW級地熱発電所において15年間で25.7億円の経費削減が可能であることを示した。	○	
⑤バイナリー発電導入時の事業費低減の検討	・実サイトでのバイナリー発電導入想定時にシリカ回収との組み合わせによる事業費低減を示す。	・バイナリー動力を発電所ないしシリカ回収プラントの動力利用の場合に最大の事業費低減効果を確認した。	○	
⑥シリカ回収の事業化に向けた調査・検討	・国内地熱発電所の状況調査、コロイダルシリカの市場性調査	・有望な国内地熱発電所の抽出、コロイダルシリカクーザーによる評価・販売コスト・市場規模を把握した。	○	

(3.7) 地熱発電プラントのリスク評価・対策手法の研究開発(スケール/腐食等予測・対策管理)

開発項目	最終目標[H29年度]	成果	達成度	目標達成のために解決すべき課題
①リスク評価システム (WEBベースの腐食・スケール予測計算システムと材料選定フローの整備)	・地熱開発の現場において遭遇する様々のリスクケースを整理した上で、各ケースのインプット・それに対するアウトプット(回答)を示し、将来的にアウトプットがどのような場面で有効活用されるかを具体的にとりまとめる。	・EXCELによる材料別の腐食速度推定式(Cr棟梁指揮・サンシャイン計画データの回帰式)、スケール上長速度式、分献検索システム、材料選定フローチャートを整備した(WEB化)。	○	
②腐食・侵食・スケール付着予測技術の開発 (3次元CFDと化学平衡反応計算シミュレータの連成・スケール成長シミュレータ)	・予測技術モジュールを用いて、過去の地熱発電所での事例をトレースして、リスク評価として適切な回答が得られることを示す。	・3次元CFD土地化学平衡反応計算シミュレータの開発、並びにスケール成長シミュレータの開発を実施した。	○	
③地熱腐食・スケールデータベースの構築 (Cr当量による材料別腐食速度計算データベース・文献データベースの整備)	・2002年以前のサンシャイン計画材料データベースの再構築と2002年以降の論文・報告書の調査並びに新たな材料試験を行い、2002年以前のデータベースに追加して行進を行う。	・Cr当量による材料別の腐食速度推定式を導出した。腐食・スケールに関する文献データベースを整備した。	○	
④材料選定の研究開発 (サンシャイン計画材料データベースに基づく腐食速度回帰式の整備)	・既存情報(サンシャイン計画材料データベース、分権、既存発電所など)を整理し、補完的な腐食試験を実施して、材料選定手法(材料選定フローチャート)をとりまとめる	・サンシャイン計画データベースの回帰式による材料別の腐食速度推定式を導出した。材料選定フローチャートを更新した。	○	
⑤プラントリスク評価システムのためのモニタリング技術の開発 (腐食試験装置の開発、スケールモニタリング装置の開発)	・低コストでの試験が可能な可搬型のフローループ腐食試験装置を開発する。 ・送流中の配管内のスケール分布を外部より測定可能なγ線透過型管内閉塞率計測装置を開発する。	・可搬型のフローループ腐食試験装置で信頼性の高いデータ取得が出来た。 ・閉塞率計測用装置で単相流・二相流配管でのシリカスケールの観測ができた。	○	
⑥地熱発電プラントリスク評	・条件の異なる既設地熱発電所で上記の①～⑤の手	・条件の異なる単相流地上配管と二相流地上配管での測定を実施し、二相流、スケール付着の計測への影響を明ら	○	

価実証試験 (単相流地上配 管と二相流地 上配管での実 証試験)	法を適用して、その効果 を実証する。	かにした。		
----------------------------------------------	-----------------------	-------	--	--

(4)地熱発電の導入拡大に資する革新的技術開発

[研究目標]超臨界地熱資源からの熱抽出が可能であることを示すこと、並びに、従来の地熱発電の発電コストと同等であることを示すこと。

表Ⅲ.1.4 個別テーマの目標と成果(最終目標に対する成果)

※達成度[◎：目標を大幅に上回って達成、○：達成、△：一部達成、×：未達]

(4.1)天然・人工地熱システムを利用した超臨界地熱発電の発電量、経済性および安全性に関する詳細検討				
開発項目	最終目標[H29年度]	成果	達成度	目標達成のために 解決すべき課題
①超臨界水の状態把握及び地下現象のシミュレーション技術	<ul style="list-style-type: none"> 国内外の代表的な超臨界地熱資源システムのモデル化を行い、資源量を試算する。 直接及び間接それぞれの熱抽出法により20MW規模出力を確認する。 	<ul style="list-style-type: none"> 東北・九州地方、アイスランド、イタリア等の超臨界地熱資源の存在可能性の高い地域の情報を収集し、資源量を概算した(岩手県葛根田地域では、約1.4GW×30年と評価)。 直接法では、生産井1本あたり約20~40MW規模の出力を確認するとともに、貯留層全体では100MWの出力を確認した。但し、間接法では、1MW程度の出力に留まり、経済性を満たせないことが判明した。 	○	今後は、我が国でのモデルフィールドでの詳細検討が必要である。
②超臨界地熱発電の実現に必要な材料・機器	<ul style="list-style-type: none"> 必要となる材料・機器とそれらの要求性能を纏める。 ケーシング材の適合性を提示する。 セメント材の適合性を提示する。 	<ul style="list-style-type: none"> 生産井・還元井の施工方法や仕上げ方法を検討するとともに、発電システム(100MW規模)について熱量バランスによる仕様を確認した。 SiC/SiC複合材の適合試験を実施し、シーシング仕様(8.5od, 0.8inch)を提示した。 アルミナセメントを試作し、従来製品と性能比較を実施した。スラリー比重1.85sgでは、良好な強度や流動特性を示した。シックニングタイムの調整に有効な遅硬化剤が必要なことが判明した。 	△	調査井と生産井についてそれぞれの仕様を再検討するとともに、腐食やスケール対策を考慮した発電システムを再検討する。
③超臨界地熱発電システムの経済性調査	<ul style="list-style-type: none"> 発電単価を提示し、従来開発と比較検討する。 	<ul style="list-style-type: none"> 経済性評価の結果、過熱蒸気直接利用のケースでは、前提条件、発電規模100MW、運転開始時生産井3本、坑井能力41MW/本、設備利用率平均90%等により、発電コスト9.8~12.6円/kWh(30年)という結果が得られ、条件によっては、評価基準値を満たす。 	△	上記を考慮したシステムで経済性調査も再検討する。
④超臨界地熱発電システム地点開発における環境影響の最小化と安全性確保	<ul style="list-style-type: none"> 超臨界地熱井試掘、開発や生産時に生じるトラブルについて検討するとともに、法令調査を実施する。 	<ul style="list-style-type: none"> 超臨界地熱開発特有のトラブルをリストアップするとともに、温泉法、電事法等の調査を実施し、法令未整備な箇所を特定した。 	○	試掘時のHSE対策については別途実施する予定。
(4.2)超臨界地熱場における革新的モニタリング及びシミュレーション技術の詳細検討				
開発項目	最終目標[H29年度]	成果	達成度	目標達成のために 解決すべき課題
①超高温環境における長期連続観測システムの検討	<ul style="list-style-type: none"> 超高温環境における長期連続観測システムの評価 	<ul style="list-style-type: none"> 最新の弾性波探査の技術を効果的に活用することにより、最適な試掘場所の選定や貯留層造成のモニタリングが効果的に実施することが可能となることが提示された。 超臨界水の存在場所と大きさ、物性を知るために地震学的観測手法を検討した。 坑内震源としてACROSS型を用いることにより進んで処理法が適用可能であり、超臨界水域で散乱される地震波を光ファイバーによるDAS(分布型地震計)で計測する。 DAS計測は>500℃に達する高温下で稠密に地震観測をでき、電源供給なしにデータが取得できる。 	○	今後は、観測機器の低価格化と高精度化の課題に取り組む。
②超臨界条件を含むシミュレーション技術の検討	<ul style="list-style-type: none"> 超臨界条件を含むシミュレーション技術の評価 	<ul style="list-style-type: none"> 非常に多くの既存シミュレータを効果的に活用するプラットフォームや可視化環境の活用により、効果的な技術開発を実施することが可能となるとの知見を得た。 	○	効果的に開発する必要のあるシミュレーション技術が多岐に渡るので、その選定が重要課題となる。

IV. 実用化に向けての見通し及び取り組みについて

IV.1 事業全体の実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて

本事業における「事業化・実用化」とは、当該研究開発に係る試作品、サービス等の社会的利用（顧客への提供等）が開始されることであり、さらに、当該研究開発に係る商品、製品、サービス等の販売や利用により、企業活動（売り上げ等）に貢献することをいう。

(1) 実用化・事業化の見通し

① 環境配慮型高機能地熱発電システムの機器開発

複合サイクル地熱発電については、地熱井の汽水比の特性に合わせた最適なフラッシュ/バイナリー比を設計に織込むことで、地熱資源を最適に利用するシステムを構築することが可能と考える。

日本国内においては、性能、経済性、環境性、地域共生などの観点から、地熱とバイオマスとを組み合わせた「地熱/バイオマスハイブリッド熱源発電システム」が最も有望である。地熱発電所における小規模実証試験の結果、蒸気過熱に起因するスケールや腐食等の問題は認められなかったことから、本システムは既存技術の組合せで構築しうる技術である。今後、本事業にてポテンシャル調査を実施した地域等において、実規模での実証試験が計画・遂行されることを期待している。

② 低温域の地熱資源有効活用のための小型バイナリー発電システムの開発

高効率温泉熱バイナリーシステムでは、湯量の多い自噴泉の泉源を候補として、バイナリー発電システムの商用プラントを数か所選定してあり、国産の日本製バイナリー発電機ユニットが完成した時には速やかに小型バイナリー発電システムを納入する予定である。また、発電効率が7%以上の小型バイナリー発電システムは初期投資金額を低く抑えられるので、償却期間も3-5年以内に償却できるので普及を促す可能性が大きい。

事業採算性と環境保全を考慮したバイナリーシステム用タービン発電機の開発設計では、250kW級システムを対象とし、開発で得られた断熱効率86%や発電効率7.8%を前提条件として、タービン発電機の製作費約94百万円に対して、年間売上は約78百万円となり、初期投資額回収期間は4-5年との見込みを得たことで、採算性確保の目途はたった。

スケール対策（物理処理によるスケール抑制）では、高周波電源では、電磁処理部（100W）及び超音波処理部（50W×2台）、振動スピーカでは、最大50W×3台の設備仕様として試算した結果、初期導入費では、償却年数を1年未満に抑えるとともに、年間維持費についても従来の約90%削減するとの評価を得た。今後、温泉事業者等と連携し、実証事業を継続し、商品化を目指す。

③ 発電所の環境保全対策技術等開発

硫化水素の拡散シミュレーションについては、経済産業省電力安全課と情報交換を行った結果、「改訂・発電所に係る環境影響評価の手引 平成29年5月改訂（経済産業省）」において従来の風洞実験に代替する手法である数値モデルが採用された。また、安比地域及び鬼首地域のそれぞれの環境アセスメントにおいても同手法が適用された。

エコロジカル・ランドスケープの手法については、経済産業省、環境省、及び日本地熱協会にてそれぞれ説明し、好評を得た。また、民間事業者からも個別に説明も実施しており、環境アセスメントやステークホルダーとの合意形成に利用を希望する事業者が数社確認されている。

簡易遠隔温泉モニタリング装置開発では、「温泉モニタリング装置実用モデル」は、製品時の基本的な構成・構造を実現しており、2020年度にも本装置を販売開始する計画を立案しつつある。また、市場調査の結果、取得したデータの分析・解析サービスに関する要望もあることが判明しており、温泉変動の解析、温泉水/熱エネルギーの最適利用等に関するサービスもビジネスとして成立する可能性が高いと判断している。

地熱発電プラントのリスク評価・対策手法開発では、エクセルベースでWEB上からアクセスできるリスク評価システムを開発したので、開発事業者のウェブサイトからアクセス可能なシステムを公開する予定である（平成30年度内）。さらに、予測技術として、二相流配管の流動形態、腐食、スケール付着などのメカニズムを推定できる手法を開発し、実証試験や発電所の諸現象について説明できるモデルの提示を行うことが可能になり、今後、公表を検討している。

④革新的技術開発

超臨界地熱発電技術については、平成30年度から、実現可能性調査を継続するとともに、試掘のための詳細検討を実施しており、3年後には、我が国における超臨界地熱資源の分布状況とそのポテンシャルが推定される予定である。

(2) 実用化・事業化に向けた具体的取り組み

地熱発電プラントのリスク評価・対策手法開発では、平成30年度以降もNEDO案件として採択され、300℃以上の高温条件でのデータベースの整備や高温耐腐食性のあるケーシング材の開発を実施している。

簡易遠隔温泉モニタリング装置開発では、平成30年度以降もNEDO案件として採択され、IoT-AI技術を適用した温泉変動予測や温泉資源の適正利用に資するソフトウェアの整備を実施している。

エコロジカル・ランドスケープの手法については、成果についてNEDOでプレスリリース（平成30年7月）を実施するとともに、国立・国定公園特別地域での地熱案件の環境アセスメント手続きに導入すべき、複数の事業者と協議している。

(3) 波及効果

地熱発電プラントのリスク評価・対策手法開発では、平成30年度からの継続案件終了後には、地熱の関連テーマ「超臨界地熱発電技術研究開発」へ継承していくテーマとなる。

簡易遠隔温泉モニタリング装置開発では、本装置が多くの温泉地に普及することで、温泉事業者へ地熱開発の理解が促進され、温泉事業者が中小規模の地熱発電を導入する機会を与えるものとなり、温泉問題の緩和に資する。

エコロジカル・ランドスケープの手法については、地熱開発以外でも、風力や送電線鉄塔建設等の山間部での開発における景観予測ツールとなり、いろいろな分野での活用が期待される。

添付資料 1

個別テーマについて(全 20 テーマ)

個別テーマ(1.1)

(1)環境配慮型高性能地熱発電システムの機器開発

(1.1)地熱複合サイクル発電システムの開発

委託先:株式会社 東芝

Ⅱ. 研究開発マネジメントについて(事業の計画内容)

(1.1.1)背景と目的

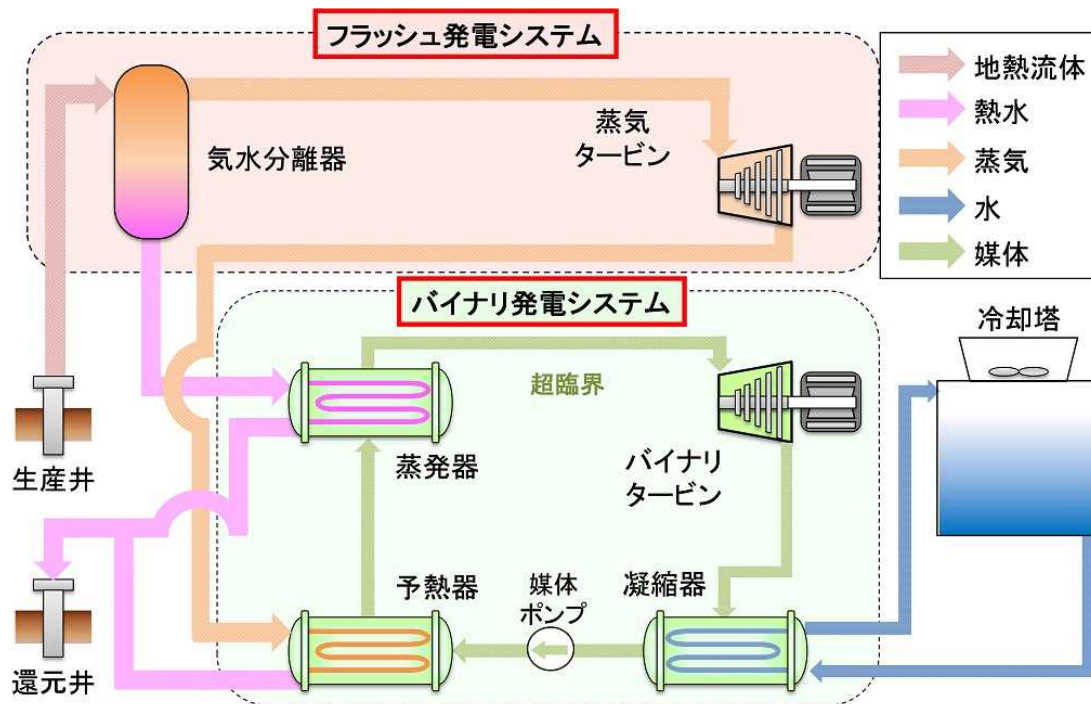
地熱発電では、地熱熱源からの蒸気で蒸気タービンを用いて発電するフラッシュ発電システムが主であるが、近年、地熱熱源からの熱水等で低沸点媒体を蒸発させ、バイナリータービンを用いて発電するバイナリーサイクル発電システムの市場が拡大している。

フラッシュ発電システムとは地熱熱源からの熱水と蒸気の二相流を気水分離器に導き、圧力を調整し、蒸気と熱水を分離後の蒸気(フラッシュ蒸気)にて蒸気タービンを駆動し発電する。地熱熱水のエンタルピーおよびフラッシュ蒸気の割合が高い場合は、フラッシュ発電システムに適するが、エンタルピーが低くフラッシュ蒸気の割合が低い場合は、商用化される例は少ない。またフラッシュ発電システムでは、気水分離器で分離された熱水は利用されずに還元井に戻されることが多く、より有効な熱エネルギーの利用が望まれている。

バイナリー発電システムは地熱熱水のエンタルピーが比較的低い場合に適する。このシステムでは低沸点媒体を地熱熱水によって気化させバイナリータービンに導き発電する。このシステムはフラッシュ蒸気の少ない場合だけでなく、熱水のみでも発電可能である。ただバイナリー発電単独では効率が低く、環境性を考慮した適正な低沸点媒体が実用化されていないことなどから、広く商用化されていない。このため、バイナリー発電システムでは、適正な低沸点媒体やより効率の高いサイクルが望まれており、さらにフラッシュ発電システムと組み合わせた複合サイクル発電システムは、気液分離後のフラッシュ蒸気割合の小さい地熱熱源においても、フラッシュ蒸気だけでなく熱水のエネルギーも利用できるため、高効率化が期待される。

一方、我が国における地熱資源の有効活用に向けて、導入ポテンシャルの高い自然公園内での開発が重要とされており、環境省において、第2種特別地域、第3種特別地域における地熱開発の規制が緩和された。しかしながら、自然公園内での新規地熱発電所建設を行う場合、依然として高効率で風致景観等への影響が小さいものが求められ、環境に配慮した取り組みが必要不可欠となっている。

そこで本研究開発では、地熱資源の有効活用の観点から、環境負荷を考慮した高効率なシステムの開発に絞込んだ技術開発を行うことを目的とした。



図Ⅱ(1.1)-1 複合サイクル発電システムの概要

(1.1.2)研究開発の概要

本研究開発では、上記複合サイクル発電システムに着目し、地熱熱源のエネルギーを最大限利用する技術を開発する。具体的には、複合サイクル発電システムの最適化を行うだけでなく、バイナリー発電サイクル側の適正な低沸点媒体の選定、地熱熱水との熱交換特性の向上や超臨界圧力を用いるなど、それらに適した機器開発を行うことを本研究開発の対象とする。一方、将来における本技術の事業化を考慮した場合、発電事業者の採算性を念頭におくべきで、例えばボイラータービン技術者の人件費、メンテナンス・オペレーション費用をはじめとしたトータルコストを考慮し、それに見合う発電規模が要求される。現状、この規模はMW級の出力とされている。

このような背景から、本研究開発では、平成27年度末までにMW級の商用地熱発電を対象とし、発電システムの高効率化に資する技術(熱効率を20%以上に向上させる技術)を開発し、環境を考慮した媒体の選定、バイナリータービンの開発、超臨界媒体向けの蒸発器・予熱器等の開発、各機器の効率を考慮した複合サイクルの高効率化等の開発を行い、その開発技術の評価を行うことができる実証試験機的设计・製作を行うことを目標に掲げ、平成26年度末までに下記開発目標に向けて、本事業を推進する。

- ・ MWクラスの商用地熱発電システムの熱効率を20%以上に向上させる技術の要素開発
- ・ 媒体の選定および各機器の基本設計および複合サイクル実証プラント全体設計
- ・ 実証試験を行うことが可能な条件の地熱井戸の確保、或いは人工的な蒸気供給が可能な代替場所の検討

①環境を考慮した低沸点媒体の選定

本開発対象の複合サイクルシステムを構成するバイナリー方式は、フラッシュ方式と異なり、その低沸点媒体を任意に選択できる自由度を有し、この媒体の選択が、複合サイクルシステム性能を大きく左右する。このシステム性能を向上させるためには、高い環境性能(低地球温暖化係数(Global Warming Potential, GWP))、安全性(低燃焼性、無毒性)、熱安定性(低分解性)高い熱サイクル性能(高効率、高輸送特性)の要素が低沸点媒体に求められる。

これまで一般的に使用されてきた低沸点媒体(ペンタン・ブタン等)の特性を基準とし、媒体メーカーが開発段階にある有望媒体も対象とした調査により、上記要求性能の比較評価を行う。

②選定された低沸点媒体に対する複合サイクル最適化の検討

複合サイクル発電はフラッシュ発電とバイナリー発電を組み合わせた発電手法であり、サイク

ルの構成も複雑となることから、多くの運転パラメータが存在する。本事業項目では、井戸条件および各要素機器の運転条件をパラメータまたは制約条件として最適化を行い、複合サイクルの熱効率について検討する。また、当該複合サイクルに関して、地熱流体エンタルピに対する出力特性の観点で、他の発電方式(フラッシュ方式およびバイナリー方式)との比較を行う。

③選定された低沸点媒体の特性に適したバイナリータービンの開発・設計

超臨界状態の低沸点媒体が使用可能なバイナリータービンの開発を行う。具体的には、選定した低沸点媒体の特性に適したタービンの最適化設計(段落数、段落負荷配分、回転数、翼枚数等)を行なう。さらにバイナリー発電システムの発電効率向上のために不可欠となる、タービン内部効率向上を目的とし、空力解析技術等を適用した3次元翼型等の検討を行なう。また低沸点媒体のタービン外への漏洩量を最小化するために、軸シール技術を適用したシール構造設計を実施する。

④選定された低沸点媒体に対する各種熱交換器の開発・設計

検討したサイクル最適化条件に従い、地熱熱水と低沸点媒体を熱交換させる蒸発器・予熱器の開発・設計、およびバイナリータービン排気の低沸点媒体と冷却水を熱交換させる凝縮器の開発・設計を行う。機器外形に関する制約条件として、60tonトレーラによる輸送を考慮する。

⑤地熱熱水によるスケール抑制技術の開発

地熱熱水に含まれるシリカやカルシウムなどが析出し、スケールとして配管に付着すると、熱交換性能の低下が懸念される。本事業項目では、スケールが生成する水質の調査と、バイナリーシステム特有の課題である蒸発器へのスケール析出を抑制する手法の検討を行う。

⑥複合サイクル発電の実証試験

①から⑤の事業項目で要素開発した技術を元に、それら開発技術の評価を行うことができるMW級複合サイクル発電の実証試験に向けた準備を進める。この複合サイクル発電の実証試験を実施するための実証プラントが建設できる地熱井を探し、所有者との交渉等を行い、使用許諾を得て実証試験場所を確保する。但し、実証試験場所が確保されることが見込めない場合、代替となる実証試験場所(使用許諾を得た人工的な蒸気供給が可能な場所等)を検討する。

表Ⅱ(1.1)-1 研究開発目標と根拠

事業項目	研究開発目標	目標レベル設定の根拠
①低沸点媒体の選定	<ul style="list-style-type: none"> 一般的に使用されてきた低沸点媒体および有望媒体を対象とした要求性能評価 複合サイクルシステムに適する低沸点媒体の検討、および選定 	効率20%以上を目標としたMW級複合サイクルの実証試験を平成29年度までに完了するため。
②複合サイクル最適化の検討	<ul style="list-style-type: none"> 井戸元条件に応じた、複合サイクルシステムの最適ヒートバランス設計 最適ヒートバランスを元にした複合サイクルが単独バイナリー方式・フラッシュ方式に対して優位となる井戸条件の推測 	
③バイナリータービンの開発・設計	バイナリータービン計画図	
④各種熱交換器の開発・設計	<ul style="list-style-type: none"> 蒸発器におけるチューブ型式・材料の検討・選択、蒸発器の型式の比較検討 凝縮器におけるチューブ型式の検討・選択 ヒートバランスを元にした各種熱交換器の計画図 	

<p>⑤スケール抑制技術の開発</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・スケール付着抑制のための薬剤選定、注入条件の検討 (以下は、地熱井戸による実証試験実施場所が確保された場合に限る) ・実地熱水の水質調査とスケール発生メカニズムの推定 ・スケール付着抑制技術がバイナリー発電サイクル性能に及ぼす効果の検討 ・スケール試験装置計画図 	
<p>⑥実証試験</p>	<ul style="list-style-type: none"> ・実証井戸の探索 (以下は、地熱井戸による実証試験実施場所が確保された場合に限る) ・効率 20%以上を目標としたMW級複合サイクルの実証 	

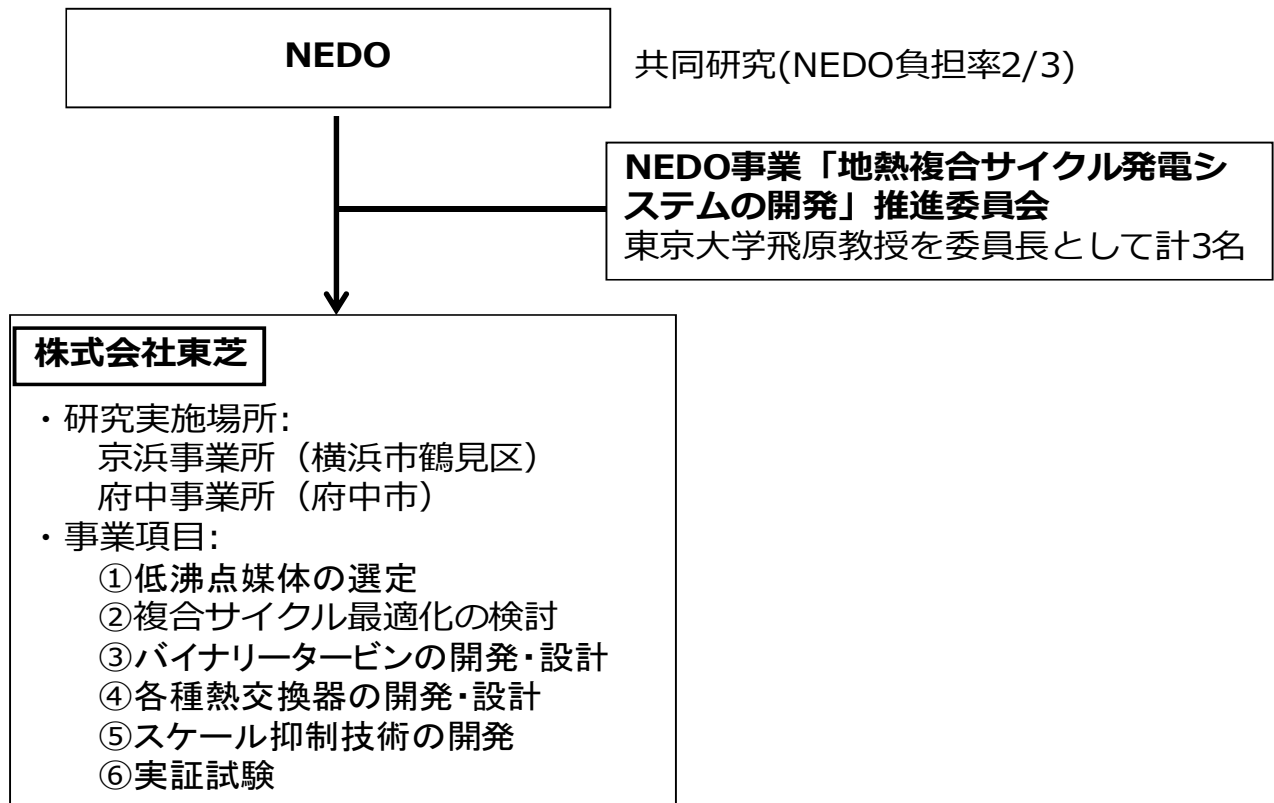
(1.1.3)事業スケジュール

本事業の研究期間は、平成25年度より平成29年度までで、主な事業スケジュールの概要を図Ⅱ(1.1)-2に示す。平成25年度後期から平成26年度にかけて低沸点媒体の選定、複合サイクル最適化の検討、バイナリタービンの開発・設計、選定された低沸点媒体に対する各種熱交換器の開発・設計、スケール付着抑制のための薬剤選定・注入条件の検討、複合サイクル発電の実証試験に資する実証試験場所の検討を行った。

事業項目	25年度				26年度				27年度(予定)				28年度(予定)				29年度(予定)			
	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q
①低沸点媒体の選定			選定																	
②複合サイクル最適化の検討			開発																	
③バイナリタービンの開発・設計			開発																	
④各種熱交換器の開発・設計			開発																	
⑤スケール抑制技術の開発			開発				設計・製作・評価(予定)													
⑥実証試験			井戸の探索		設計(予定)				製作・据付(予定)				試験(予定)							

図Ⅱ(1.1)-2 研究開発のスケジュール

(1.1.4)研究開発の実施体制



(1.1.5)研究開発の運営管理

表Ⅱ(1.1)-2 地熱複合サイクル発電システムの開発 NEDO 事業「地熱複合サイクル発電システムの開発」推進委員会

株式会社東芝

担当	氏名 (敬称略)	所属
委員長	飛原 英治	国立大学法人 東京大学 大学院新領域創成科学研究科 教授
委員	土屋 範芳	国立大学法人 東北大学 大学院環境科学研究科 教授
委員	宗像 鉄雄	独立行政法人 産業技術総合研究所 福島再生可能エネルギー研究所 所長代理

所属は、委員会組織時点のもの

Ⅲ. 研究開発成果について

MW級の商用地熱発電を対象に、複合サイクル発電システムの高効率化に資する技術(熱効率を20%以上に向上させる技術)開発を目的として、環境を考慮した媒体の選定、バイナリータービンの開発、超臨界媒体向けの蒸発器・予熱器等の開発、各機器の効率を考慮した複合サイクルの高効率化等の開発を行い、その開発技術の評価を行うことができる実証試験機の設計・製作を行うことを目標に掲げて、平成26年度末までに各事業項目において以下の成果をあげる事ができた。

①環境を考慮した低沸点媒体の選定

低沸点媒体の要求性能と新旧媒体の比較およびランキンサイクルによる熱サイクル効率ポテンシャルの比較から、有望な低沸点媒体を絞り込み、複合サイクルに適する低沸点媒体を選定した。

②選定された低沸点媒体に対する複合サイクル最適化の検討

井戸条件および各要素機器の運転条件をパラメータまたは制約条件としてシステムの最適化を行い、熱効率20%へ到達する複合サイクルのヒートバランスを構築した。また、当該複合サイクルに関して、地熱流体エンタルピに関する出力特性の観点でフラッシュ方式およびバイナリー方式との比較を行い、各々の方式が優位となる条件を明らかにした。

③選定された低沸点媒体の特性に適したバイナリータービンの開発・設計

低沸点媒体で使用可能なバイナリータービンの開発・設計を行った。ヒートバランスに基づきバイナリータービンの通路部性能を検討した。また、3次元翼型の適用検討を行って性能向上を確認した。さらに、軸シールシステム設計を行い、ダブル型ウェット式メカニカルシールを採用することとした。以上の検討成果を元にバイナリータービン計画図を作成した。

④選定された低沸点媒体に対する各種熱交換器の開発・設計

井戸条件に基づくヒートバランスに従い、地熱蒸気、低沸点媒体の特性に応じた最適な熱交換器を計画した。機器制約条件として、道路輸送を考慮した。伝熱促進を考慮し、管外側の熱抵抗を低減させるため、圧力損失が小さく伝熱面積を大きく出来るローフィン管を検討した。伝熱管材料は、耐食性と製造性から、オーステナイト系ステンレス鋼SUS316Lを適用した。プラントを構成する蒸発器、凝縮器、予熱器の機器仕様を決定した。

⑤地熱熱水によるスケール抑制技術の開発

地熱熱水の調査を行い、東北地方の地点Aの水質を基にして、スケール生成能を検討した。還元温度120℃としたときに、地上設備へのスケール生成の懸念があったため、2種のスケール抑制手法を検討した結果、カルシウム結合剤とシリカ分散剤を用いる手法を選定した。90℃の模擬地熱水を用いた3週間の循環試験において、薬剤添加によるスケール抑制効果が確認できた。

⑥複合サイクル発電の実証試験

複合サイクル発電の実証試験に適する井戸条件に従って交渉相手を選定し、粘り強く交渉を進めたが、それぞれに困難な課題があり、所有者の許諾が得られなかった。これ以上探索を続けても、課題を解決できる国内井戸を確保するのは極めて困難であり、かつ見込みがなかった。一方、代替実証試験場所も検討したが、上記同様に課題があり極めて実施困難であった。

表Ⅲ(1.1)-1 特許、論文、外部発表等

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表		
	国内	外国	PCT※ 出願	査読 付き	その 他	学会発表・ 講演	新聞・雑誌等 への掲載	その他
H25FY	1件	0件	0件	0件	0件	0件	0件	0件
H26FY	2件	0件	0件	0件	0件	3件	0件	0件

(※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約)

[最終目標に対する成果と達成度]

表Ⅲ(1.1)-2 最終目標に対する達成度

事業項目	現状	最終目標 (平成 29 年度末)	達成見通し
①低沸点媒体 の選定	複合サイクルに適する低沸点媒体 を選定した。	効率 20%以上を目標 とした MW 級複合サ イクルの実証	井戸条件が決まれば比較的短時間で 実証設備が製作で きるレベルまで達 成したが実証試験 場所が見つからな かった。当該テー マについては、地 熱複合サイクル発 電システム開発案 件対処検討有識者 協議会を H27 年 4-7 月に開催の 上、実証試験未実 施で契約を完了す る事を決定した。
②複合サイク ル最適化の 検討	熱効率 20%へ到達する複合サイク ルのヒートバランスを構築した。 他の発電方式と比較し、優位とな る条件を推測した。		
③バイナリー タービンの 開発・設計	構築したヒートバランスに基づ き、バイナリータービンの通路部 性能を検討し、軸シールシステム 設計を行った。それら結果を元に バイナリータービン計画図を作成 した。		
④各種熱交換 器の開発・ 設計	構築したヒートバランスに従っ て、選定した低沸点媒体の特性に 応じた各種熱交換器を計画した。		
⑤スケール抑 制技術の開 発	地熱熱水の調査を行い、スケール 生成能を検討した。また 2 種のス ケール抑制手法を検討した結果、 カルシウム結合剤とシリカ分散剤 を用いる手法を選定し、それら薬 剤添加によるスケール抑制効果が 確認できた。		
⑥実証試験	実証試験場所を確保できず、代替 場所を検討したが極めて実施困難 であった。		

IV. 実用化に向けての見通し及び取り組みについて

本研究開発にて開発される地熱複合サイクル発電システムは商用サイズの地熱発電であることから、実証試験が完了した時点で商用プラントのサイクルとして適用が可能となる見込み。実際には地熱資源の規模やエンタルピーにより機器構成が異なるため、地熱井戸の試掘などにより地熱条件が特定された後、機器設計や製作期間を要するが、これまでの研究開発成果を利用することにより、比較的短期間で商用の地熱発電システムを製作可能なレベルまで来ている。また、開発した複合サイクル発電システムのみならず、構成要素であるバイナリーシステム部分も単体システムとして、上記同様の適用が可能である。

個別テーマ(1.2)

(1)環境配慮型高機能地熱発電システムの機器開発

※「(4)地熱発電の導入拡大に資する革新的技術開発」テーマ

(1.2)地熱発電適用地域拡大のためのハイブリッド熱源高効率発電技術の開発

委託研究先:電力中央研究所、富山大学

II. 研究開発マネジメントについて(事業の計画内容)

(1.2.1)背景と目的

2010年6月に「エネルギー基本計画」が閣議決定され、その中で、地熱発電は2030年までに設備容量150万kW(2007年度実績 53万kW)、発電電力量103億kWh(2007年度実績 30億kWh)の導入拡大が掲げられている。2012年の東日本大震災以降、再生可能エネルギー導入拡大が望まれる中、世界第3位となる地熱資源を有する我が国では、ベース電源として活用可能な地熱発電が大きな注目を集めている。

しかしながら、貯留層より汲み出した地熱蒸気をタービンにて仕事をさせ電気出力を得る一般的な地熱発電システムでは、地熱蒸気は日本国内においては概ね0.5MPa前後の飽和蒸気であるため、地熱発電システムでは、火力発電所のように高い効率は望めず、汽力発電所のタービン効率が約46%であるのに対し、地熱発電所の発電効率は17%程度※と効率の低いシステムとなっている。また、地熱発電システムのタービンは飽和蒸気タービンであることから、タービン入口のノズル部において、特にシリカスケールの析出が、タービン後段においては湿り度が増加し、水滴が発生することによるエロージョンが大きな問題となる。近年では、地熱井の探査技術や掘削技術などが発達したため、比較的深部にある地熱資源が開発されるようになり、地熱蒸気圧力が2MPa程度まで増加する傾向にある。タービン入口の蒸気圧力が上昇すると、タービン最終段における湿り度は益々増加し、前述のエロージョンは益々厳しいものとなるため、ドレンポケットやエロージョンシールドなどの対策を強化する必要がある。

そこで、本事業では、外部熱源を利用してタービンに流入する地熱飽和蒸気を過熱することにより、20%を超える発電効率が期待でき、且つエロージョンによるタービン損傷の低減が図れるハイブリッド熱源高効率発電システムを開発することを目的とする。

※ 蒸気井より0.5MPa飽和蒸気のみが生産されるものとし、タービン断熱効率は80%、真空度は700mmHg(冬期)と仮定した場合における発電効率。ここで、発電効率は以下の式で定義した。

発電効率 = 発電端出力 / 地熱蒸気の総熱量

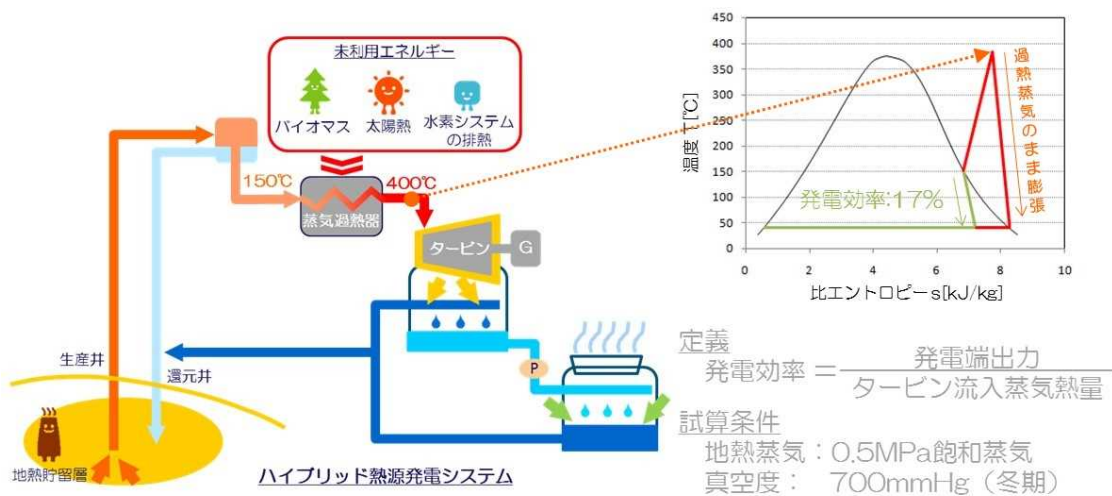


図 II (1.2)-1 地熱蒸気過熱による高効率発電システム

(1.2.2)研究開発の概要

①ハイブリッド熱源発電システムの成立性評価

本事業で技術開発するハイブリッド熱源高効率発電システムは、地熱エネルギーと、バイオマスを始めとする他の未利用エネルギーとを効果的に組み合わせることによって、従来の地熱発電システム以上の高効率化を期待するものである。具体的には、バイオマス燃焼熱などを外部熱源として利用し、タービンに流入する地熱飽和蒸気を過熱することによって、発電効率20%超を狙う。本システムでは、タービンを通過する蒸気が過熱蒸気となることから、従来システムで問題となっているタービンにおけるエロージョンの抑制が期待できるとともに、バイオマス利用の場合、バイオマス発電設備と、地熱発電設備とを別々に建設した場合に比べ、タービン、復水器、冷却塔などの設備を共用できることから経済性に優れる、などの利点を有する。

外部熱源によりタービン流入前の地熱蒸気を過熱する

蒸気過熱によるメリット

- ① 蒸気条件が向上することにより、**熱効率が向上**
- ② タービン内部で蒸気が湿ることがないため、タービン最終段において**エロージョンが発生しない**(水滴による機械的損傷)



蒸気過熱の着想は30年以上前に特許登録※1されたが、実現されなかった

今だからこそ実現可能な「革新的技術」

※1 JPA-1977106044 「ガスタービン・地熱タービン組合せ発電プラントの運転方法及び装置」

加えて…

地熱蒸気とバイオマスなどの自然エネルギーとを効果的に組み合わせた

「ハイブリッド熱源高効率発電システム」を提案

図Ⅱ(1.2)-2 ハイブリッド熱源発電システムとは

上述のように、地熱発電システムにおいて、蒸気井後流の湿分分離器とタービンとの間に外部熱源を利用する熱交換器を設置し、タービン流入前の飽和蒸気を過熱すると、タービンにおける熱落差が増加し、システムの熱効率が向上すると考えられる。このようなシステムについて、効率、出力、運用性などの面からシステム構成を検討し、電中研開発のソフトウェア「発電システム熱効率解析汎用プログラム(以下EnergyWin)」を用いてシステム全体のヒートバランスを解析するとともに、それぞれのシステムの発電効率を試算する。また、外部熱源として具体的にバイオマスなど(その他、太陽熱、燃料電池排熱などを想定)を利用した場合における、提案システムの発電効率を試算するとともに、システムの効率、運用性、外部熱源を地熱発電所内に設置するに際しての法制度などの観点から、それぞれのシステムの特徴および課題を整理する。

②ハイブリッド熱源発電システムの実運転条件の検討

事業内容①において有望とされた外部熱源について、外部熱源と地熱発電システムとのインテグレーションを検討し、構築したシステムの実運用時の性能を把握するとともに、システムの経済性を評価する。また、商用機を想定した場合におけるシステムの運転条件を検討するとともに、EnergyWinを用いて同条件におけるシステム全体のヒートバランスを解析し、それぞれのシステムの熱効率、或いは発電効率を試算する。

③スケールセンサーの開発

本事業では、通常の地熱発電システムを構成する要素機器に加えて、地熱蒸気を過熱するため

の熱交換器(以下、地熱蒸気過熱器とする)の開発が新たに必要となる。この地熱発電システムの実用化を阻害する主要な要素としてスケール・腐食の問題がある。同熱交換器の入口では、スケール成分が溶解している残存液滴により、タービンノズルと同様にスケールが析出する可能性が否めず、熱交換器内においては、作動流体が従来型地熱発電システム以上に高温となるため、よりスケールが発生し易く、腐食環境もより厳しいものとなる恐れがある。

そこで、主要なスケール成分であるシリカの付着状況(付着場所や付着速度)をリアルタイムで観測できれば、その対策方法を事前に検討できるばかりでなく、地熱蒸気過熱器の構造設計にも反映することが可能である。本研究では、これまで開発を行ってきた光ファイバーセンサを応用して、多点的に遠隔モニタリングすることが可能なスケールセンサーを新規開発する。そのセンサの室内評価試験を得て、地熱蒸気過熱器を模擬した試験設備を製作し、実フィールドにて地熱蒸気を用いた暴露試験を実施する。スケール析出および腐食に関する現象を把握し、スケールの化学的な解析、水質分析の結果を基に、その対策技術を考案する。スケールについては、主としてシリカを想定しているが、硫化物や炭酸カルシウムについても沈殿する可能性が否定できないことから、これらのスケールも視野に研究を進める。

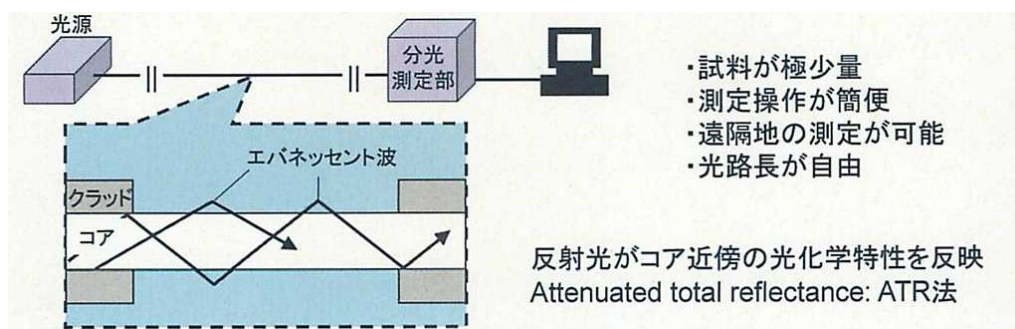


図 II (1.2)-3 開発予定のスケールセンサー概念図

④ハイブリッド熱源高効率発電システムの小規模実証試験

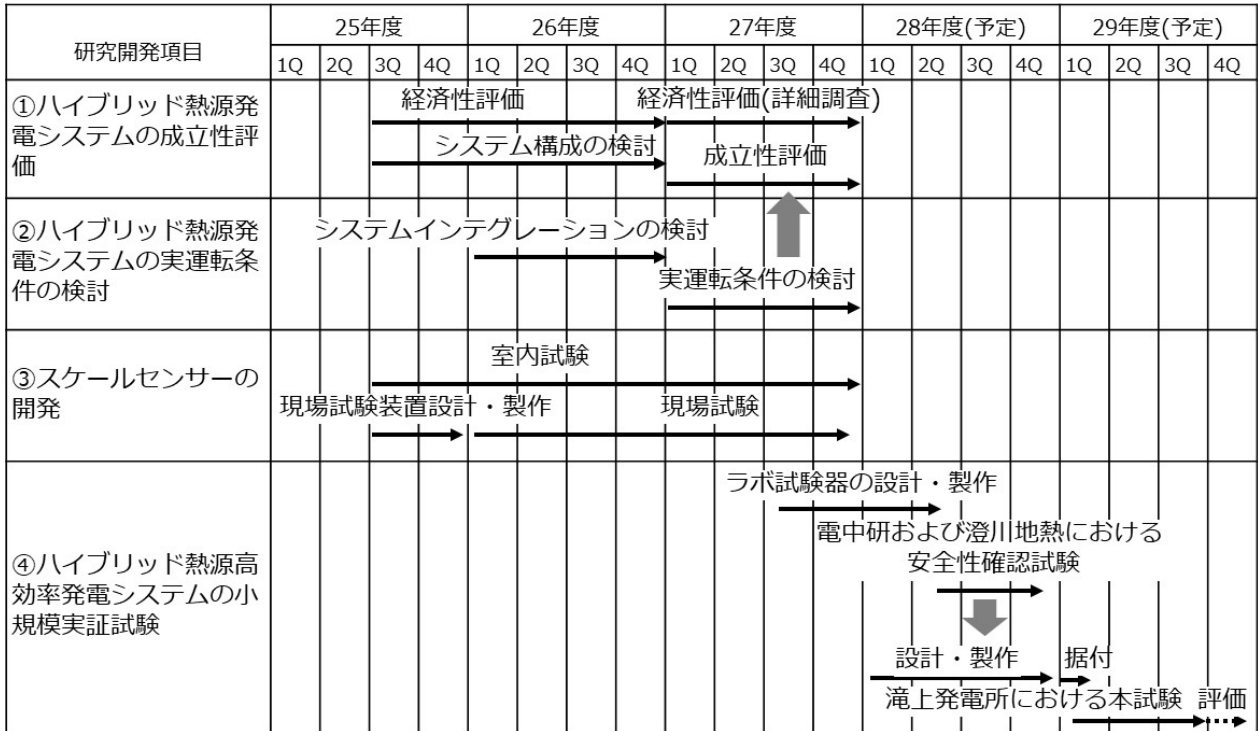
蒸気過熱器および100kW級タービン初段までを再現した、ハイブリッド熱源発電システムの実証試験設備を製作し、実フィールドにて長期暴露試験を実施し、システムの長期信頼性を検証する。

表Ⅱ(1.2)-1 研究開発目標と根拠

事業項目	開発目標	目標レベル設定の根拠
①ハイブリッド熱源発電システムの成立性評価	地熱発電システムとして、発電効率が20%以上となるシステムを開発する外部熱源の調達も含めて、事業性が成立する可能性があるハイブリッド熱源発電システムを開発する	<ul style="list-style-type: none"> ・地熱発電システムとしての発電効率が20%以上であること ・外部熱源による発電設備と地熱による発電設備を個々に用いた場合に比べ経済性に優れ、個々の発電能力の合算値よりも高効率であること ・発電原価がFIT価格を下回るなど、事業性が成立する可能性があること
②ハイブリッド熱源発電システムの実運転条件の検討		
③スケールセンサーの開発	<ul style="list-style-type: none"> ・光ファイバーセンサーによるスケール付着への連続的な光応答を得る ・スケールの付着量や沈殿速度とセンサー応答の関係を明らかにする ・蒸気過熱器での実証試験を行う際にセンサーによってスケール付着状況を観測する 	<ul style="list-style-type: none"> ・炭酸カルシウム、シリカの付着に対してセンサーがリアルタイムで応答を示すこと ・スケール生成によるセンサー応答への影響を明らかにし、それらの関係が明瞭に得られること ・蒸気過熱器で生成するスケールをセンサーによって測定できること
④ハイブリッド熱源高効率発電システムの小規模実証試験	スケール付着防止策等を講じることで、“事業性を考慮した期間”連続運転が可能な地熱蒸気過熱器を開発する	<ul style="list-style-type: none"> ・法定点検のためにプラントを停止するまでの期間、連続運転できることが望ましい

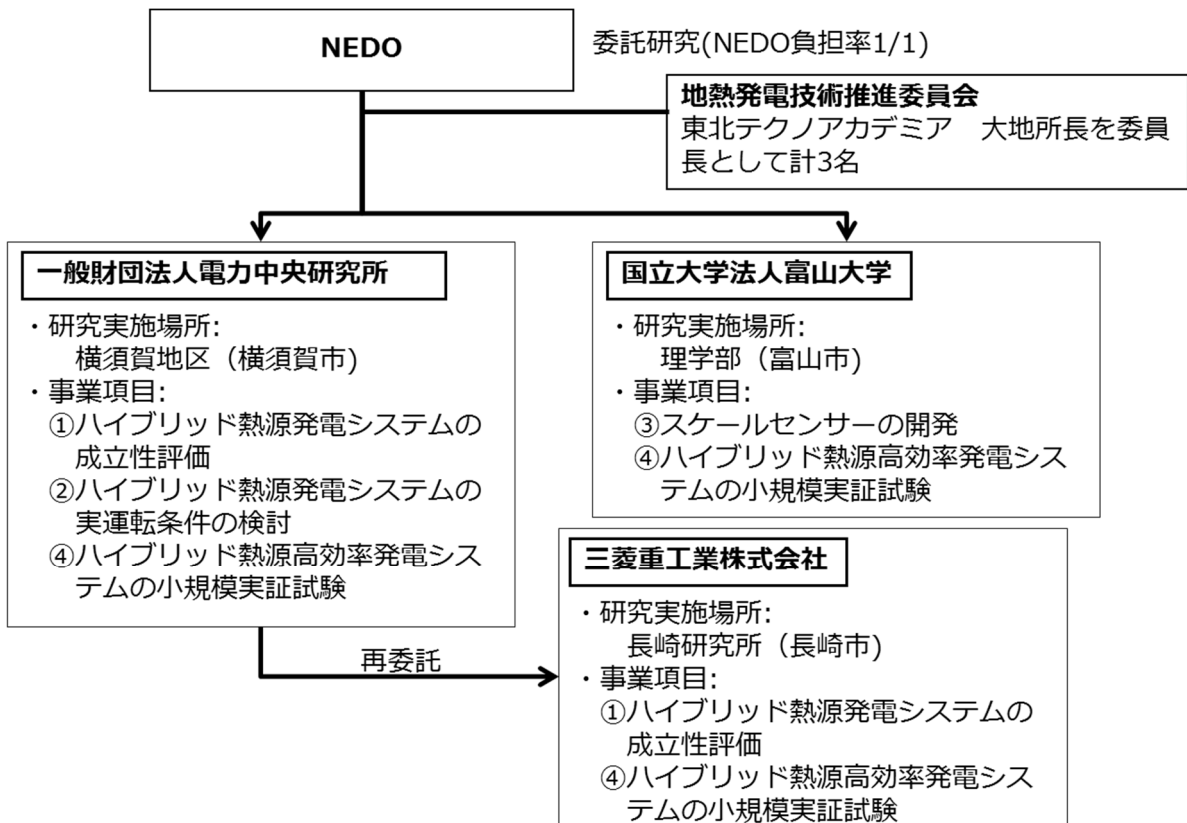
(1.2.3)事業スケジュール

本事業の研究期間は、平成25年10月1日より平成30年2月28日までで、主な事業スケジュールの概要を図Ⅱ(1.2)-3に示す。地熱発電技術推進委員会は延べ9回実施した。



図Ⅱ(1.2)-3 研究開発のスケジュール

(1.2.4)研究開発の実施体制



(1.2.5)研究開発の運営管理

表 II (1.2)-2 地熱発電適用地域拡大のためのハイブリッド熱源高効率発電技術の開発 技術検討委員会
一般財団法人電力中央研究所
国立大学法人富山大学

担当	氏名 (敬称略)	所属
委員長	大地 昭生	東北テクノアカデミア 産学連携事務所 所長
委員	有木 和春	三菱マテリアル株式会社 エネルギー事業部 地熱・電力部長
委員 (平成 28 年 7 月 26 日まで)	石崎 潤一	東北電力株式会社 火力原子力本部 火力部 副長
委員 (平成 28 年 7 月 27 日から)	小野寺 亨	東北電力株式会社 火力原子力本部 火力部地熱統括センター 副所長

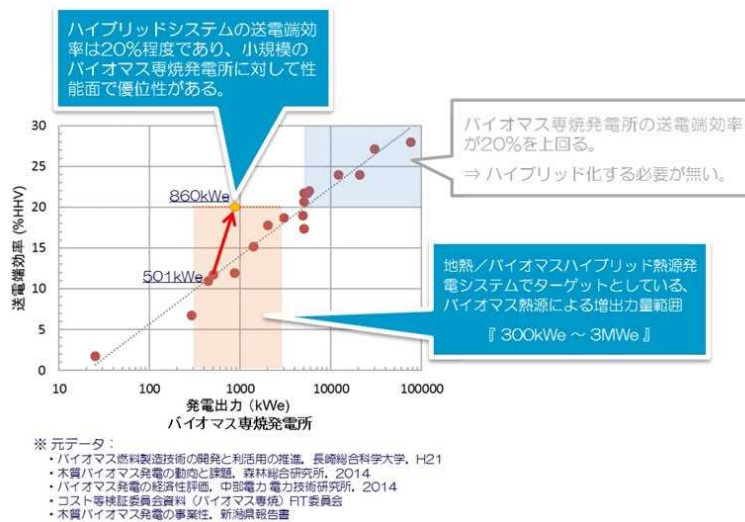
所属は、委員会組織時点のもの

Ⅲ. 研究開発成果について

「ハイブリッド熱源発電システムの成立性評価」では、電中研開発のソフトウェア「発電システム熱効率解析汎用プログラム (EnergyWin®)」を用いて、地熱エネルギーと他の未利用エネルギーとのインテグレーション方策を検討した。そして、それぞれのシステムについて熱効率解析を実施したところ、従来の地熱発電システムに蒸気過熱器を設置し、タービンに流入する前の地熱飽和蒸気を外部熱源 (600℃) により約 400℃まで過熱することによって、システムの発電効率が 20%HHV を上回り、発電出力が約 3 割増加する (冬季条件) ことを示した。

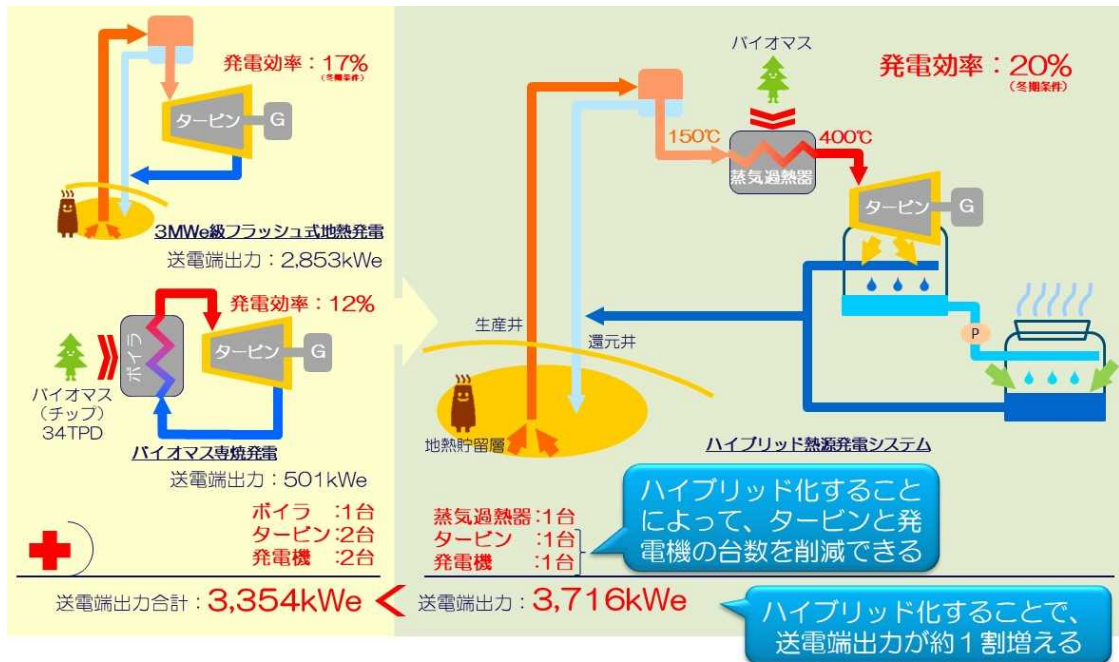
また、ハイブリッド熱源発電システムに組み合わせる外部熱源について、システムの性能、運用性、外部熱源を地熱発電所内に設置するに際しての法制度などの観点から、システムの成立性評価を実施した。その結果、日本国内の設備容量が 9MWe までの地熱発電システムとのハイブリッド化にはバイオマスが、外部熱源として有望であることが分かった。

図Ⅲ(1.2)-1 にバイオマス専焼発電所の発電出力と送電端効率との関係を示す。これより、発電出力が 5MWe を超えると 20%HHV 以上の送電端効率での発電が可能であるが、それ以下の場合には送電端効率が 20%HHV を下回り、さらに 1MWe 以下の場合には 15%HHV を下回ることが分かる。一方、地熱・バイオマスハイブリッド熱源発電システムでは、設備規模に依らず 20%HHV 程度の発電効率が期待できる (図中、赤破線)。従って、バイオマス熱源による増出力量が 3MWe を上回ると、地熱発電所とバイオマス専焼発電所とを別々に建設した方がハイブリッド化するよりも発電効率が高いが、バイオマス熱源による増出力量が 3MWe までのハイブリッド化においては性能面において優位性を持つ。



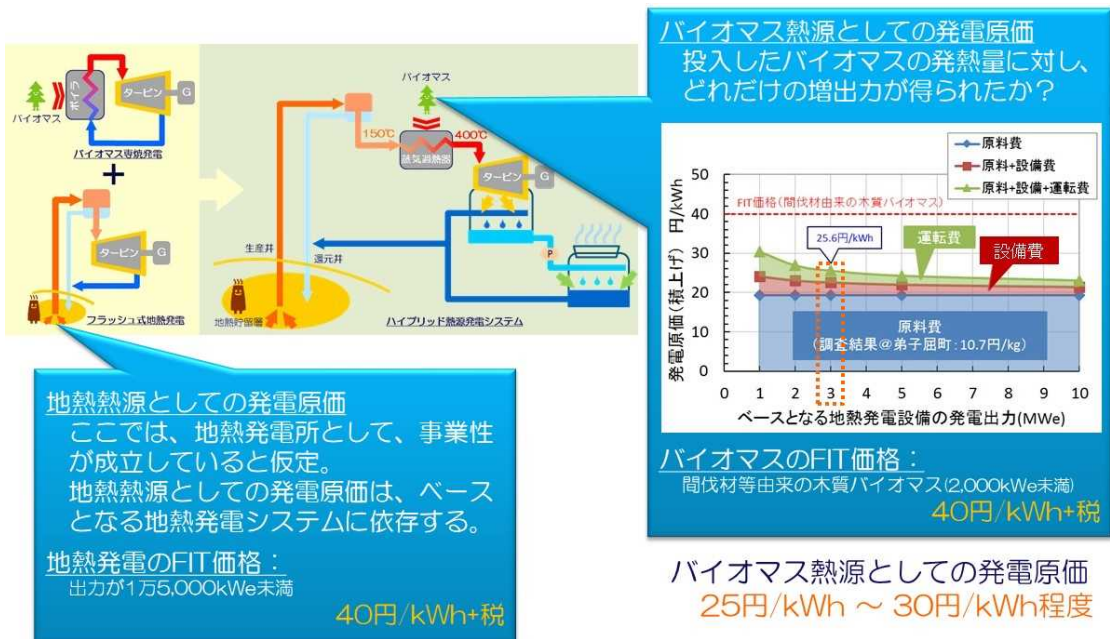
図Ⅲ(1.2)-1 地熱とバイオマスを組み合わせたハイブリッド熱源発電システムの適用範囲

「ハイブリッド熱源発電システムの実運転条件の検討」では、環境負荷の小さい地熱開発の優良事例として挙げられる八丈島地熱発電所 (3MWe 級) を参考にして、蒸気過熱器及びバイオマス関連設備の概念設計及び得られた設備仕様を解析条件とした全体システムの熱効率解析を実施した。そして、バイオマス専焼発電所と地熱発電所とを別々に建設した場合と比較したところ、ハイブリッド熱源発電システムの方が約 0.3MWe、約 1 割の送電端出力の増加が期待でき、且つ、タービン、復水器、冷却塔などの主要設備を共用することで設備コストを低く抑えられることが分かった (図Ⅲ(1.2)-2)。



図Ⅲ(1.2)-2 地熱とバイオマスをハイブリッド化することによるメリット

また北海道上川、弟子屈、及び東北八幡平地域を対象としたバイオマスのポテンシャル調査に基づき、ハイブリッド熱源発電システムのバイオマス熱源としての発電原価を試算したところ、いずれの地域においても 25～30 円/kWh 程度と、“間伐材等由来の木質バイオマス”の FIT 価格 (40 円/kWh) を下回ることが分かった (図Ⅲ(1.2)-3)。

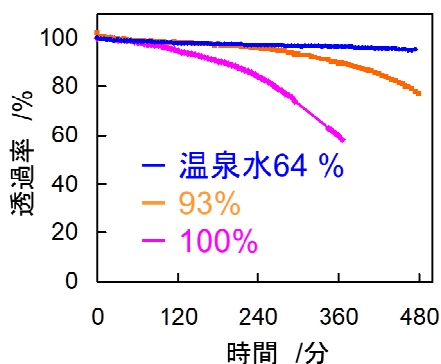


図Ⅲ(1.2)-3 ハイブリッド熱源発電システムの発電原価試算例

「スケールセンサーの開発」では、光ファイバーを利用したスケールセンサーを開発した。コアをむき出しにした光ファイバーをセンサーとして高原と検出器に接続すると、コア表面へのスケール付着に伴う屈折率変化を光応答として検出することが可能となる。このセンサーについて、松代温泉にて現地試験を行い、熱水から生成する炭酸カルシウムの析出をセンサーで検出することに成功した (図Ⅲ(1.2)-4)。シリカスケールについては現地試験を澄川地熱発電所で行い、シリカ 980mg/L、93℃の地熱熱水からのスケールをセンサーによって評価することに成功した (図Ⅲ(1.2)-5)。過熱蒸気からのスケール生成についてセンサー有用性を評価した結果、蒸気暴

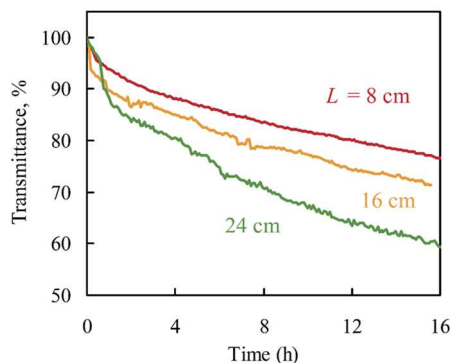
露に伴う光透過率の低下が確認できた。澄川・滝上地熱発電所におけるラボ試験器を用いたフィールド試験では、応答への温度や乾き度の影響は見られたものの、測定終了後のセンサーにスケールではない黒い付着物が見られた。

松代温泉での炭酸カルシウム測定



図Ⅲ(1.2)-4 松代温泉における試験結果

澄川地熱発電所でのシリカ測定

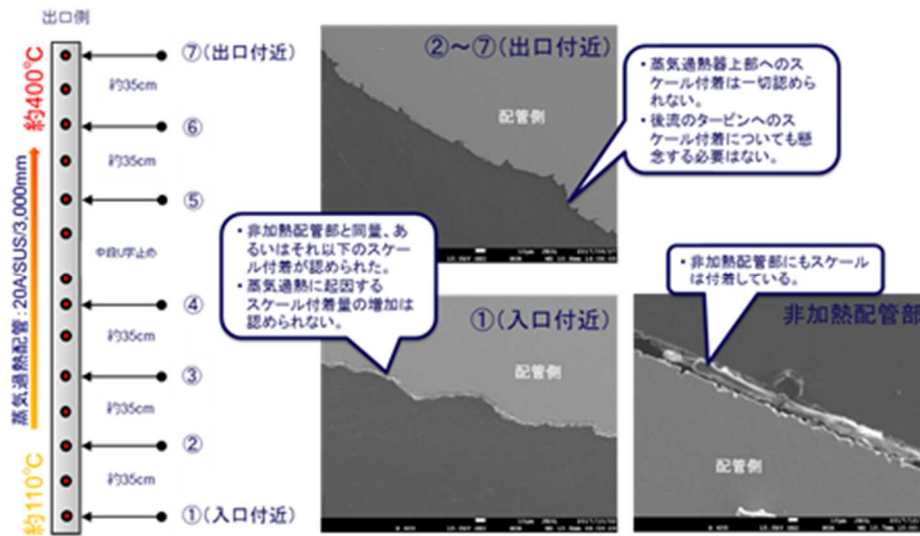


図Ⅲ(1.2)-5 澄川地熱発電所における試験結果

「ハイブリッド熱源高効率発電システムの小規模実証試験」では、平成 29 年 7 月 3 日～7 月 13 日に滝上発電所にて、実規模の蒸気過熱器配管 1 本分に相当する小規模実証試験器を用いた蒸気過熱試験を実施した（図Ⅲ(1.2)-6）。本試験にて生産井二相流配管より分離した飽和蒸気を 400℃まで、延べ 5 日間連続で過熱したところ、配管の内壁表面に蒸気過熱に起因するスケール付着や腐食に関する問題は認められなかった（図Ⅲ(1.2)-7）。



図Ⅲ(1.2)-6 開発した小規模実証試験器



図Ⅲ(1.2)-7 電子顕微鏡による蒸気過熱器配管の観察結果 (滝上地熱発電所)

表Ⅲ(1.2)-1 特許、論文、外部発表等

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表		
	国内	外国	PCT*出願	査読付き	その他	学会発表・講演	新聞・雑誌等への掲載	その他
H25FY	0件	0件	0件	0件	0件	0件	0件	0件
H26FY	0件	0件	0件	0件	0件	4件	0件	5件
H27FY	0件	0件	0件	1件	0件	6件	0件	1件
H28FY	1件	0件	0件	0件	0件	3件	0件	3件
H29FY	0件	0件	0件	3件	0件	3件	1件	3件

(※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約)

[最終目標に対する成果と達成度]

表Ⅲ(1.2)-2 最終目標に対する成果と達成度

事業項目	最終目標 (平成 29 年度末)	成果	達成度
①ハイブリッド熱源発電システムの成立性評価	地熱発電システムとして、発電効率が20%以上となるシステムを開発する。また外部熱源の調達も含めて、事業性が成立する可能性があるハイブリッド熱源発電システムを検討する。	地熱発電システムとしての発電効率が 20%HHV を上回り、発電出力が約 3 割増加する(冬期条件)ことを示した。日本国内の設備容量が 9MWe までの地熱発電システムとのハイブリッド化にはバイオマスが外部熱源として有望であることが分かった。またバイオマスのポテンシャル調査に基づき、ハイブリッド熱源発電システムの発電原価を試算し 25~30 円/kWh 程度と、“間伐材等由来の木質バイオマス”の FIT 価格(40 円/kWh)を下回ることが分かり、事業として成立する可能性があることを示した。	○(達成)
②ハイブリッド熱源発電システムの実運転条件の検討			
③スケールセンサーの開発	<ul style="list-style-type: none"> 光ファイバーセンサーによるスケール付着への連続的な光応答を得る スケールの付着量や沈殿速度とセンサー応答の関係を明らかにする 蒸気過熱器での実証試験を行う際にセンサーによってスケール付着状況を観測する 	スケール付着に伴う屈折率変化を光応答として検出できるスケールセンサーを開発した。また松代温泉および澄川地熱発電所にて、開発したセンサーを地熱流体に暴露する試験を実施し、炭酸カルシウム及びシリカスケールのセンサー表面への析出をセンシングすることに成功した。	○(達成)
④ハイブリッド熱源高効率発電システムの小規模実証試験	スケール付着防止策等を講じることで、“事業性を考慮した期間“連続運転が可能な地熱蒸気過熱器を開発する	滝上地熱発電所にて、小規模実証試験器を用いた暴露加速試験を実施し、蒸気過熱に起因するスケール付着や腐食等の問題が認められなかったことを確認した。	○(達成)

IV. 実用化に向けての見通し及び取り組みについて

ハイブリッド熱源発電システムについては、本研究において、日本国内において、性能、経済性、環境性、地域共生などの観点から、地熱とバイオマスとを組み合わせた「地熱/バイオマスハイブリッド熱源発電システム」が最も有望であることが判明した。

本システムの最大の課題は、開発候補地点の選定であり、地熱およびバイオマスの双方の賦存量が必要十分であることを調査しなければならない。また、地熱蒸気性状は地熱フィールド毎に異なるため、新規開発においては、開発候補地点の蒸気に対する過熱試験を実施し、スケール付着状況を確認する必要がある。

そこで、地熱開発事業者、電気事業者、自治体等への理解促進を目的としたヒアリングを継続して実施するとともに、蒸気過熱試験の簡素化、標準化を目指すなど、本システムの商用化に向けた取り組みを推進する。また、本成果を日本地熱学会学術講演会や技術セミナー等で発表し、アピールする。

光ファイバースケールセンサーについては、日本国内の様々な地熱発電所、温泉にてその実用性を検証し、熱水中のスケール生成に伴う良好な応答結果を得ている。

実用化に向けては、現在、比較的高額で大型な分光検出器を使用して応答を解析しているところ、LEDとフォトダイオードの組み合わせを利用し、安価で小型なポータブルセンサーを目指すことが考えられる。加えて、センサー設置における取り扱いの煩雑さを改善するとともに、蒸気からのスケールセンシングについては流量の影響などの諸検討が必要である。

個別テーマ(2.1)

(2)低温域の地熱資源有効活用のための小型バイナリー発電システムの開発

(2.1)無給油型スクロール膨張機を用いた高効率小型バイナリー発電システムの実用化

委託先 アネスト岩田株式会社

II. 研究開発マネジメントについて（事業の計画内容）

(2.1.1)背景と目的

近年、比較的温度の低い蒸気や熱水でも、低沸点媒体を熱変換して利用することで発電可能なバイナリー発電の導入が米国を中心に進みつつある。特に我が国では、低温地熱エネルギーの中でも温泉熱エネルギーが全国各地に分布し、温泉熱を発電に利用することで地域分散型の電源として活用できることが期待されている。

しかし、温泉熱を利用する場合、温泉源噴出量、設置環境、導入コストを鑑みると従来の数十kW以上のモデルでは市場ニーズに合わないために普及するに至らず、10kW以下の小型モデルでの高効率化と低コストが望まれてきた。

バイナリー発電システムの小型化を図る場合には、ランキンサイクルの心臓部となるタービン(膨張機)を容積型流体機構にしなければならず、その中でもスクロール機構が小型モデルに適していると言われている。さらに普及促進のためには小型でも高効率化を図ることが課題となる。

当事業では、バイナリー発電システムの膨張機にスクロール機構を用いるとともに、低沸点媒体への混油を極力排除することで、ランキンサイクル内のポンプ動力を低減しつつ熱交換器での熱交換効率の向上を図り、システム全体発電効率7%を達成し、小型で普及促進となるバイナリー発電装置を開発することを目的とする。

(2.1.2)研究開発の概要

温泉熱源では1源泉あたりの噴出量が200～300L/minのところが多く、従来のバイナリー発電システムでは過大なために適応できず、小型化するためには高効率な膨張機を開発する必要があった。また、バイナリー発電装置の心臓部である膨張機は、効率よく膨張することと駆動部の潤滑という2つの機能が必要であるが、従来は低沸点媒体に潤滑油を混合させることで両立させていた。しかし、潤滑油混合方式では、循環量が増えるためにポンプの大型化による消費電力の増大を招き、また潤滑油被膜による熱交換器での熱交換効率の低下が懸念される。

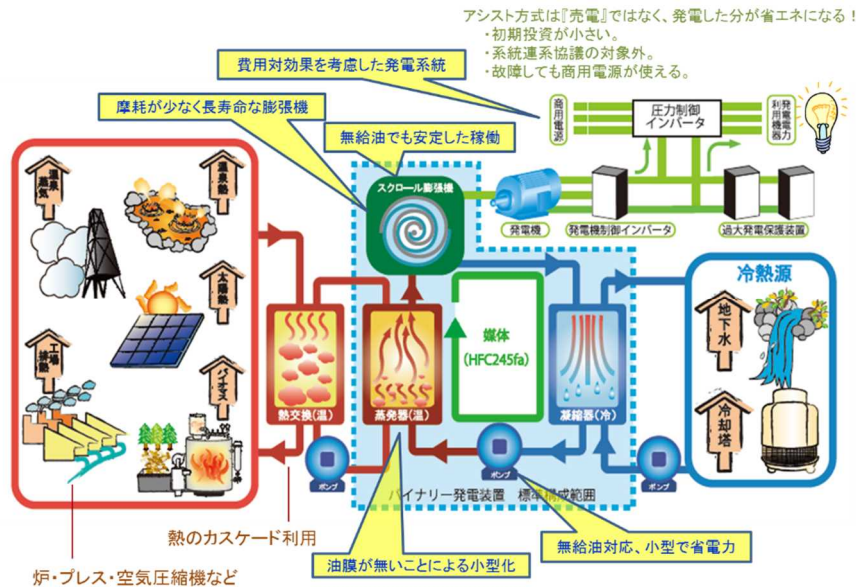
本事業では、駆動部・膨張室分離方式のスクロール膨張機を搭載し、ランキンサイクル内での無給油化を図り、低沸点媒体の性能を100%引き出すと共に、ポンプの消費電力削減と熱交換効率の向上により小型で普及性が高い数kW～十数kWクラスのバイナリー発電システムを次の目標のもとに開発する。

- ・発電効率7%を達成
- ・潤滑油を使用することなく連続30,000時間の運転が可能な駆動部とシール部においては、摩耗量として2.0mm/30,000時間以下となる材料、潤滑機構を達成
- ・コスト面においては、11kWの場合に10百万を実現

これら高効率、高寿命、低コストにより、温泉熱(地熱)固定買い取り制度が42円/kWhで維持された場合には5.5kWクラスでも4年程度でイニシャル部分の投資回収ができることになる。また、発電量を負荷にアシストする方式であれば、売電収益は期待できないもののシステムが簡素化することで大きな節電効果が得られることになる。

本事業の開発の中心となる無給油型スクロール膨張機機構は、2013年5月に特許出願しているが、ランキンサイクル回路とスクロール膨張機の駆動機構を分離することで、低沸点媒体が持つ固有の性能を引き出すことができる。

また、スクロール膨張機内の純度が高い低沸点媒体中での潤滑については国立研究開発法人産業技術総合研究所との共同研究で最適化と長寿命化を図る。



これらを次の3年間の事業計画に基づいて開発する。

平成25年度

無給油型スクロール膨張機的设计製作、バイナリー発電システム試作1号機の製作および初期評価を実施する。無給油型スクロール膨張機については、開発費用と期間を抑えるために単体評価も計画する。併せて、膨張機内摺動部のトライボシステムに関して、試験条件設定と材料検討を開始する。

平成26年度

初年度での評価で得られた課題に対して設計変更を行うとともに、耐摩耗材料と潤滑機構の改善内容をフィードバックして潤滑機構と材料を用いたバイナリー発電システムで最適化を図る。

平成27年度

2年間の開発結果を踏まえ、またトライボシステムに関する加速試験などによる材料選定結果を含めたバイナリー発電システム試作2号機の製作とそのフィールド試験を行う。

事業の実施は、アネスト岩田(株)本社のR&Dセンター(横浜)を中心に設計および評価を行い、トライボシステムの開発については、国立研究開発法人産業技術総合研究所つくば事業所にて行う。また、実証試験は実際の温泉井戸を利用することを計画している。

表Ⅱ(2.1)-1 研究開発目標と根拠

事業項目	研究開発目標	目標レベル設定の根拠
①無給油型スクロール膨張機および小型バイナリー発電システムの開発	発電効率7%	現状が5%前後にとどまっていることを鑑みて、小型であっても発電出力を最大化して費用対効果を向上させる。
	11kWの場合にコスト10百万	他の再生可能エネルギー利用との比較および投資回収効果を鑑みて900千円/kWを装置価格のターゲットとした。
②摺動特性を向上するトライボシステムの開発	潤滑油を使用することなく連続30,000時間の運転が可能な駆動部とシール部においては、摩耗量として2.0mm/30,000時間以下となる材料、潤滑機構を達成	約4年間の連続運転が可能であり、軸受などの機械部品とメンテナンスサイクルに合わせられることから、システムの生涯コストを削減できる。

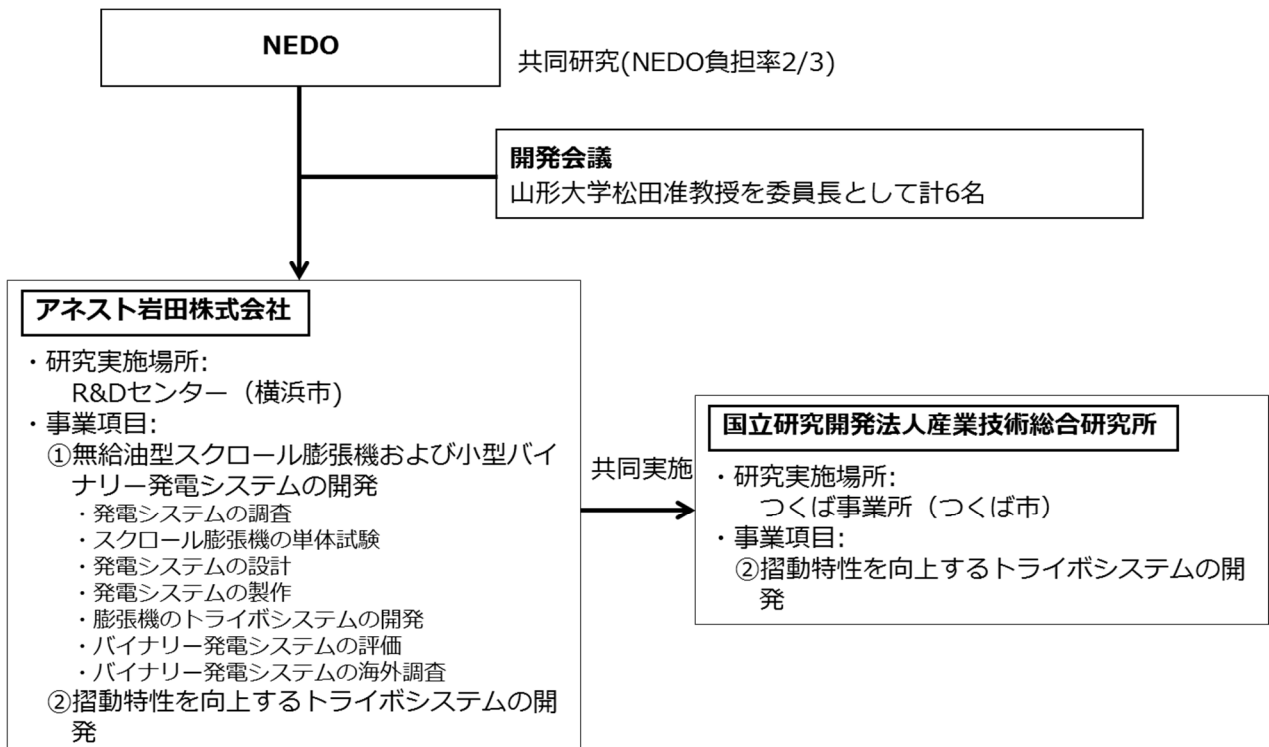
(2.1.3)事業スケジュール

本事業の研究期間は、平成25年8月1日より平成28年2月28日までで、主な事業スケジュールの概要を図Ⅱ(2.1)-3に示す。

事業項目	25年度				26年度				27年度			
	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q
①無給油型スクロール膨張機および小型バイナリー発電システムの開発 ・発電システムの調査 ・スクロール膨張機の単体試験 ・発電システムの設計 ・発電システムの製作 ・発電システムの評価 ・発電システムの海外調査			←→		←→				←→			
			←→									
			←→		←→	最適化				←→		
			←→	試作1号機			←→				←→	試作2号機
				←→				←→				←→
				←→		←→			←→			
②摺動特性を向上するトライボシステムの開発 ・スクロール膨張機のトライボシステムの開発			←→									

図Ⅱ(2.1)-3 研究開発のスケジュール

(2.1.4) 研究開発の実施体制



(2.1.5) 研究開発の運営管理

表 II.2.3-2.1 無給油型スクロール膨張機を用いた高効率小型バイナリー発電システムの実用化 開発会議
アネスト岩田株式会社

担当	氏名 (敬称略)	所属
委員長	松田 圭悟	国立大学法人 山形大学 大学院理工学研究科 准教授 国立研究開発法人 産業技術総合研究所 エネルギー・環境領域 福島再生可能エネルギー研究所 再生可能エネルギー研究センター クロスアポイントメントフェロー
委員	古谷 博秀	国立研究開発法人 産業技術総合研究所 エネルギー・環境領域 福島再生可能エネルギー研究所 再生可能エネルギー研究セン ター 副センター長
委員	前田 哲彦	国立研究開発法人 産業技術総合研究所 エネルギー・環境領域 福島再生可能エネルギー研究所 再生可能エネルギー研究セン ター
委員	桂木 聖彦	日本地下水開発株式会社 常務取締役
委員	藤岡 完	アネスト岩田株式会社 圧縮機器事業部開発技術部 コアコンポーネント開発プロジェクト マネージャー
委員	和泉 孝明	アネスト岩田株式会社 圧縮機器事業部開発技術部 コアコンポーネント開発プロジェクト

所属は、開発会議組織時点のもの

Ⅲ. 研究開発成果について

比較的低温少容量の地熱エネルギーを電力エネルギーに変換し有効活用する小型バイナリー発電システムの普及、市場浸透に資する環境保全技術の取り組みに際し、バイナリー発電システムの実証モデルを製作評価するとともに、バイナリー発電装置の性能維持とメンテナンス期間延長のコア技術となるスクロール膨張機の摺動特性を向上させるトライボシステムに関する要素技術を確立し、以下の成果を得た。

- (1) 無給油型スクロール膨張機および小型バイナリー発電システムの開発
スクロール膨張機を搭載したバイナリー発電システムを設計開発した。
本研究開発では次の理由からスクロール機構を採用した。
- ・小型領域において高効率期待される。
 - ・温泉地の普及型バイナリー発電システムにおいては、旅館に隣接した場所に設置されることも想定されることから低騒音が強いニーズとなり、トルク変動が小さくスクロール機構が優位となる。
 - ・当社にてスクロール圧縮機、スクロール真空ポンプの生産ラインがあり、設備投資することなく安価に量産体制を構築できる。

(1) -1. 小型バイナリー発電システム評価①

パッケージサイズと質量を小さくした3kW級の1次試作は、幅1200mm、奥行1140mm、高さ1500mm、質量約800kgとし、温泉地での実証試験を実施した。

(評価項目)

- ・膨張機およびサイクルの安定駆動
⇒実際の温泉熱で安定稼働することを確認。
⇒実サイクルで最適媒体量の評価を実施。
- ・シール性能確認
⇒本体軸シールから媒体の漏れを確認し対策が必要となった。

(課題と対策)

- ・媒体の漏れ→磁気カップリングを採用する。



内部構造

バイナリー発電システム(3kW級パッケージ無し、大分県別府市)

(1) -2. 小型バイナリー発電システム評価①

大分県の実証試験結果より、シールおよびスクロール膨張機本体のプロファイルを変更し、山形県米沢市での実証試験を実施した。(平成27年11月より)

また、シミュレーションも併せて行い、発電効率の検証も行った。

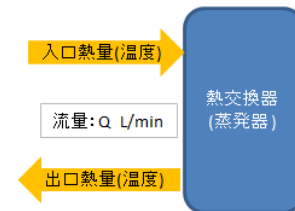
(評価項目)

- ・膨張機およびサイクルの安定駆動 ⇒実際の温泉熱で安定稼働することを確認。
- ・対策の実証(シール) ⇒磁気カップリングに変更したことにより、冷媒漏れは対策完了。
- ・発電性能及び効率評価 ⇒送電端発電量 = 2.6~6.6kWh
⇒熱効率 = 3.3~4.3%

※効率計算 発電効率 = 送電端発電量/入力熱量

(課題と対策)

- ・効率改善
⇒媒体ポンプの最適化
⇒熱交換器の最適化
⇒冷媒の最適化
- ・耐久性能確認
⇒小野川温泉にて運転



$$\begin{aligned} \text{発電効率} &= \text{送電端電力} / \text{交換熱量} \\ \text{交換熱量} &= (\text{入口温度} - \text{出口温度}) \times \text{流量} \end{aligned}$$



図27 バイナリー発電システム(試作機: 3kW級パッケージ)

※発電性能評価(シミュレーション結果)について

発電装置入口温度80℃の時、最大の発電端発電量8.32kWとなり、ポンプ出力1.66kWだったため、送電端電力(Qout)は6.57kWとなった。この時の交換熱量(Qin)は201.kWhなので、発電効率は、6.57kW/2014kWh×100=3.26%となった。

また、発電装置入口温度60℃の時、最小発電端発電量3.89kWとなり、ポンプ出力1.21kWより、発電端電力(Qout)は2.68kWとなった。この時、交換熱量(Qin)61.8kWhなので、発電効率は、2.68kW/61.8kWh×100=4.34%となった。

以上の結果から、送電端発電量が2.6~6.6kWhであり、熱効率は3.3~4.3%という結果が得られた。

また図29の上図はHFC-245faを使用した発電量と発電効率のグラフ、下図は今回の液ポンプを使用した場合の発電量と発電効率のグラフとなる。

本試験結果では、最高効率4.3%であったが、シミュレーション結果としてはHFC245fa媒体を使用した理論最大が7.3%の熱効率を得られる可能性があることがわかる。

但し、今回の液ポンプを使った場合、消費電力が高く、ポンプの押し込み圧力も足りなかったため、発電効率も全体的に低い値を示したと考える。

また、押し込み圧力と発電効率の相関性に関しては今後の課題として考える。

(結果)

1次側熱量を確保したうえで主に媒体ポンプの最適化(押し込み圧力、流量、消費電力の削減)を図れば目標の7%を実現できる可能性がある。

媒体については、現行HFC245faのみならず、小型バイナリーシステムに合ったものであれば、より高効率化を図れる。

(課題)

媒体ポンプの最適化。
次世代媒体への対応。
熱交換器の最適化。
連続耐久性能。

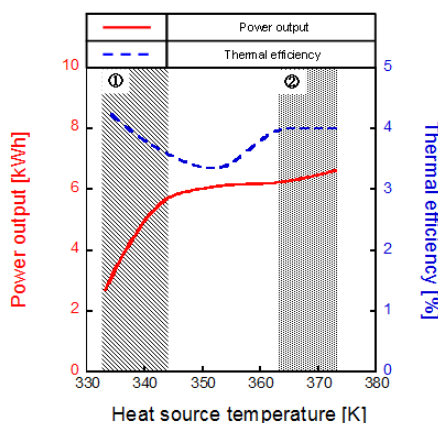
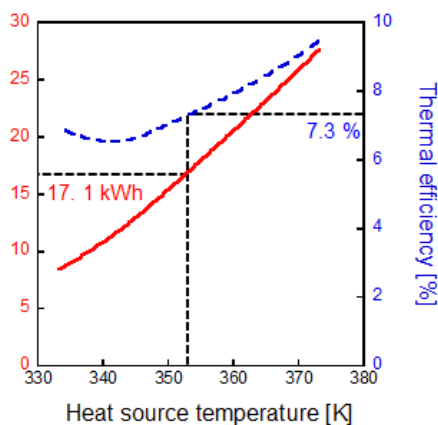


図 29 温泉温度と発電量/熱効率

上図 HFC-245fa を使用した発電量と発電効率のグラフ

下図 今回の液ポンプを使用した場合の発電量と発電効率のグラフ

(1) -3 11kW級モデル構想設計

3kW級本体をトリプレックス (3.6x3台) とすることで、10~11kW級を実現する。

スクロール膨張機3台に対して、発電機と蒸発器は1対であるが、凝縮器は過冷却上のリスクが少ないために共有とすることで全体効率を高める。

本システムは、小規模熱源では起こりうる熱量の変動に対応するために、入力熱量に対して稼働する本体+発電機+蒸発器を制御することが可能となる。

温泉源および工場排熱においては熱量の変動が大きな場合があり、大型を低熱量で運転するのではなく、熱量に合った台数だけを運転することで発電効率を高めるようにする。

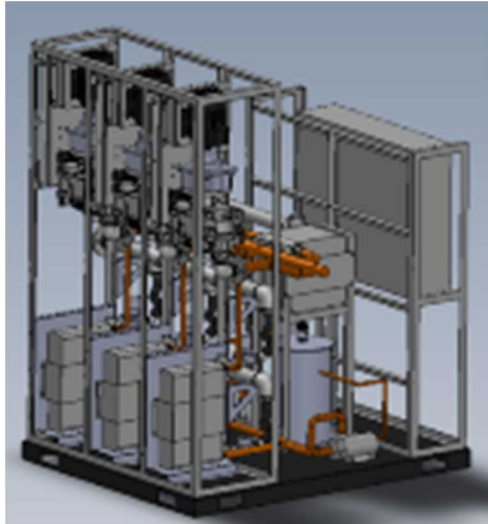


図10 バイナリー発電システム（トリプレックスモデル）構想図

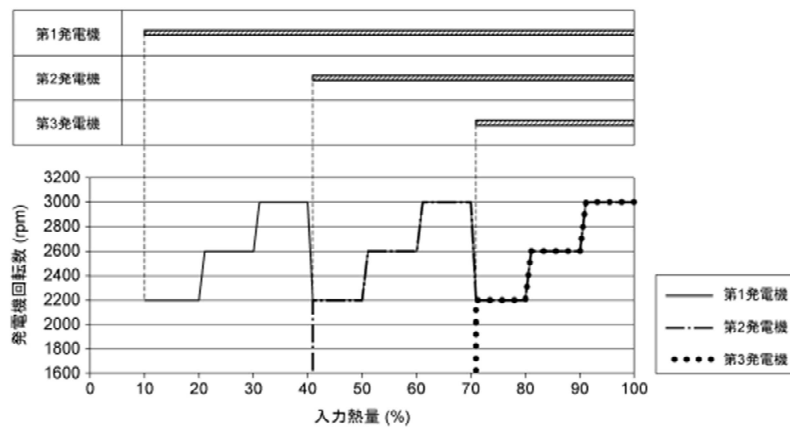


図11 バイナリー発電システム（トリプレックスモデル）フロー図

(2) スクロール膨張機のトライボシステムの開発

スクロール膨張機の渦巻部先端には、膨張効率を維持するためにポケット間の漏れを抑制するチップシールがあり、耐摩耗性とシール性が求められる。本研究開発では、ランキンサイクル内に潤滑油を混合させないことにより、純度が高い低沸点媒体環境下でのチップシールの潤滑特性の向上が鍵となる。

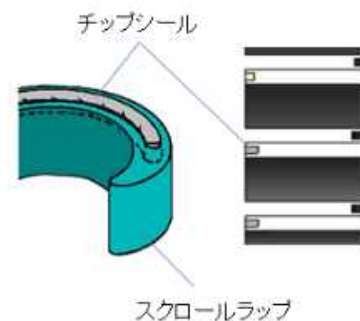


図22 スクロール膨張機
チップシール機構

初年度は、過去の経験と知見による材料の1次スクリーニングを行うとともに、材料メーカーと共に生産性も鑑みて樹脂系候補材料と充填剤の配合を決定した。

また、低沸点媒体環境下での摩耗特性を検証するために圧力、温度、荷重の条件設定が可変で

きる摩耗試験機を製作し、評価を行った。

二年目は、スクロール膨張機のチップシールの耐摩耗性及びシール性の検証のため、初年度作製した圧力、温度、荷重の条件設定が可変できる摩耗試験機を用いて、高分子を主成分とした複合材料の摩擦摩耗特性の検討を行った。低沸点媒体環境下における摩擦特性および摩耗量の比較により、複合材料のスクリーニングを行い、摩擦係数の変動の少ない材料でかつ耐摩耗性の優れた材料の配合比について検討を行った。

最終年度はスクロール膨張機のチップシールの耐摩耗性及びシール性の検証のため、昨年度作製した圧力、温度、荷重の条件設定が可変できる摩耗試験機を用いて、高分子を主成分とした複合材料の摩擦摩耗特性の検討を行った。低沸点媒体環境下における摩擦特性および摩耗量の比較により、複合材料のスクリーニングを行い、摩擦係数の変動の少ない材料でかつ耐摩耗性の優れた材料の配合比について検討を行った。



図 23 摩耗試験機

最終的には、スクリーニングされた材料を実際の条件（周囲圧力、荷重、温度、速度）に照らし合わせて、相手材候補の面粗度条件と共に摩耗状況評価を行った。

最終選定材料については、材料メーカーと実機に組み込む製作法についても協議を行い、実機での確認用チップシールを制作した。

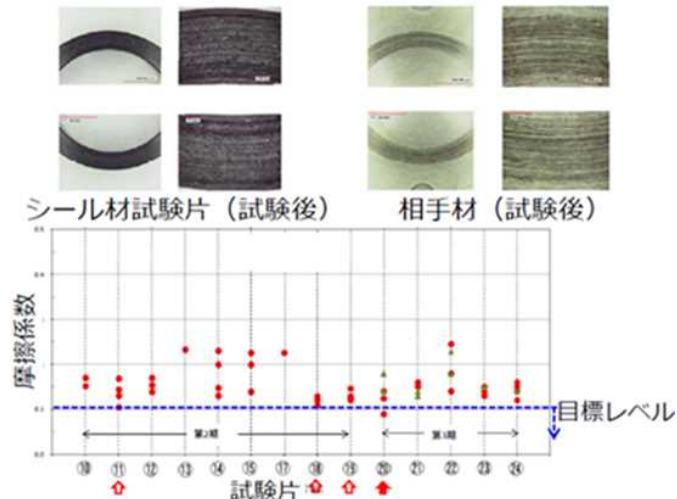


図24 チップシール材料のスクリーニング結果

また、二年目結果により、目標寿命をクリアできる小摩耗係数材料を選定できたために、配合の微調整を試みた追加スクリーニングによる更なる小摩耗係数性能と実機への組み込むための製作性を鑑みて最終材料を決定した。

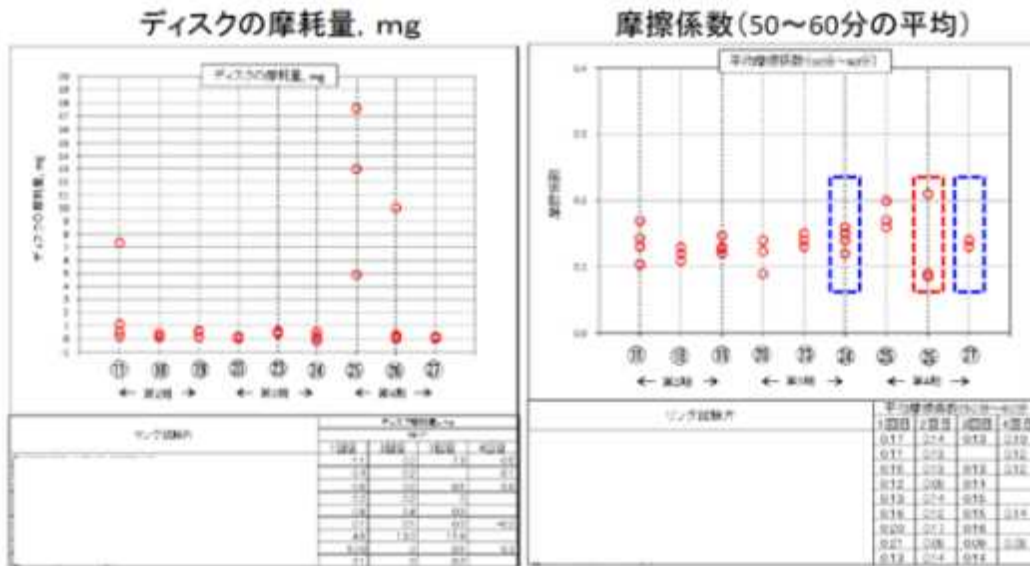


図25 チップシール材料の摩耗試験結果

(3) バイナリー発電システムの海外調査

バイナリー発電システム/ORCの実用化が進む欧州を中心に調査を行った。

(市場性)

地熱を熱資源とした10kW程度の小型バイナリー発電システムの普及についてはシステム価格で10百万円程度が普及の目安と考えている。太陽光等の出力単価が20~50万円/kWとされ、地熱用の小型バイナリー発電システムは24時間稼働を前提にしたとしても、システム単独では100万円/kWのコストがネックとなるが、発電後の熱を再利用できることを鑑みて、再生可能エネルギーの利用として10kW/10百万円が普及するうえでの条件と考える。

(生産性)

エアコンプレッサ用ドライヤメーカーなどによってシステム化が容易に可能であり、日本国内で海外規格対応した製品を作らなくても、本事業のスクロール膨張機とシステムノウハウを使って現地でのシステム化が可能となる。

(販路)

コージェネとの組み合わせにより欧州でのビジネスが可能であり、その結果コアパーツの量産効果によってコスト低減がなされ、日本の地熱発電市場への普及が促進される。

表Ⅲ(2.1)-1 特許、論文、外部発表等

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表		
	国内	外国	PCT※ 出願	査読 付き	その 他	学会発表・ 講演	新聞・雑誌 等への掲載	その他
H25FY	0件	0件	0件	0件	0件	3件	0件	0件
H26FY	0件	0件	0件	0件	0件	2件	0件	2件
H27FY	0件	0件	0件	0件	0件	2件	1件	0件

(※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約)

[最終目標に対する成果と達成度]

表Ⅲ(2.1)-2 最終目標に対する成果と達成度

事業項目	最終目標 (平成 27 年度末)	成果	達成度
①無給油型スクロール膨張機および小型バイナリー発電システムの開発	発電効率 7%	<ul style="list-style-type: none"> 設計製作したバイナリー発電システムの温熱源 80℃の実証試験では熱効率 4.3%であったが、温熱源が 100℃を超える温泉蒸気や、新媒体の利用、トリプレックスモデルによる高効率化により熱効率 7%の達成の見込みを得た。 	△ 温熱源が 100℃を超える温泉蒸気や、新媒体の利用、と熱の 2 次利用で総合効率を高めることで達成する見通し
	10 百万円/11kWシステム	<ul style="list-style-type: none"> 現時点では装置価格 11 百万円で提供できる見込み 事業化計画では、コジェネなどへの展開によるマスマリットとシステムのアウトソーシングで投資に伴う減価償却費を無くすことで 10 百万円が達成できる見込みを得た。 	
②摺動特性を向上するトライボシステムの開発	<p>膨張機駆動部： 潤滑油不使用で連続 30,000 時間運転を見通す。</p> <p>膨張機シール材、潤滑機構： 摩耗量 2.0mm/30,000 時間以下</p>	<ul style="list-style-type: none"> 製造面も考慮したうえで、目標を満足できる材料を開発した。 材料のスクリーニングが終わり、ラボ評価での可能性を見出した。 	○
③海外調査と普及促進	海外での市場性を確立し、生産、調達を含めたグローバル化でマスマリットによる品質と性能の向上とコスト低減を図る。	<ul style="list-style-type: none"> エアコンプレッサ用ドライヤメーカーなどによってシステム化が容易に可能であり、海外現地でのシステム化が可能となる。 コジェネとの組み合わせにより欧州でのビジネスが可能であり、その結果コアパーツの量産効果によってコスト低減がなされ、日本の地熱発電市場への普及が促進される。 	○

IV. 実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて

本研究開発ではスクロール膨張機をコアコンポーネントとしたシステムの最適化が重要なアウトプットとなる。試験での結果を踏まえて、小型でも連続負荷に耐えうる商用ベースの普及モデルが確立できる見込みとなっている。

取り組みとしては、小型でも更なる高効率化を図るための機械動力の低減、媒体ポンプ動力の低減、熱交換器効率の向上を重点に改良を図っていく。

また、グローバル視点で費用対効果が高い製品供給を図るために、国・地域の特性に合ったシステム要件をまとめ、生産性を確立していく。

スクロール膨張機は新規設備投資をすることなく既存設備を活用して量産化を実現し、システムは本事業のノウハウをもとにアウトソーシングをすることで普及型の生産性を確保し、販路を構築しながら事業成立性を確保する。



個別テーマ(2.2)

(2)低温域の地熱資源有効活用のための小型バイナリー発電システムの開発

(2.2)温泉の蒸気と温水を有効活用し、腐食・スケール対策を施したハイブリッド型小規模発電システムの開発 委託先 アドバンス理工株式会社、株式会社馬淵工業所

II. 研究開発マネジメントについて（事業の計画内容）

(2.2.1)事業の目的と目標

近年、比較的温度の低い蒸気や熱水でも、低沸点媒体を熱変換して利用することで発電可能なバイナリー発電の導入が米国を中心に進みつつある。特に、我が国では、低温地熱エネルギーの中でも温泉熱エネルギーが全国各地に分布し、温泉熱を発電に利用することで地域分散型の電源として活用できることから、バイナリー発電の導入拡大に資する技術開発が期待されている。しかしながら、既存の地熱・温泉熱利用の発電設備・システムは中規模・大規模(20kW以上)であり、小規模事業者が圧倒的に多い温泉施設・温泉宿泊施設は、規模の大きい発電事業や熱の有効利用等の事業を行うことは困難である。

そこで、本事業では、温泉地域の実情に合致した小規模・低温度域での温水・蒸気エネルギーの活用・推進を図るため、温水、蒸気の双方への対応による柔軟なシステム構成によって市場の拡大を実現するハイブリッド型小規模発電システムの開発を行うことを目的とする。

事業性を考慮して、小湧出量(50ℓ/分程度)、低湧出温度(80℃程度)の温泉で利用可能なバイナリー発電システムの開発において、以下の目標を達成する。

- i)システム全体の発電効率(熱効率)：7%以上、連続運転10,000時間
- ii)機器の維持管理頻度、耐用年数：維持管理年1回、耐用年数15年以上
- iii)システム全体の耐用年数：維持管理年1回、耐用年数15年以上
- iv)システムの維持管理コスト：収益の10%以内(収益稼働率90%以上)
- v)導入コスト：5,000千円/1システム以下

(2.2.2)研究開発の概要

◎全体システムの概要

本件は、申請者であるアドバンス理工(株)(旧社名：アルバック理工(株))が開発、性能の確認が完了し、既に実証段階にある可搬型小型発電機を用いて、温泉地における小型・分散型地域発電システムを構築するための、機器開発を行う。

温泉地での実証実験は、宮城県鳴子温泉に営業所を有する株式会社馬淵工業所が担い、効率とコストを追求したシステムの周辺設備開発を行う。

小型・分散型地域発電システムは、温水発電と蒸気発電の双方の開発＝ハイブリッド型発電システムとし、以下に示す研究・開発をその内容とする。以下にシステム全体像を示す。

本研究開発は、3つのシステムの開発・実用化(3つの開発テーマ)とその実用化に必要となる4つの機器開発を想定している。開発を行う3つのシステムは、温水発電システム、蒸気発電システム、そして前掲の2つのシステムを統合したハイブリッドシステムからなる。

4つの機器開発とは、温水発電システム開発における『温泉水による腐食・スケール対策を施した熱交換器の開発』、蒸気発電システムにおける『スクロール型蒸気膨張機の開発と小型高効率蒸気膨張機の開発』と『小型高効率復水器の開発』さらに『小型気水分離器』からなる。本研究開発においては、『気水分離器』は便宜的に蒸気発電システムの開発のなかで実施する。前掲の4つの機器開発のイメージを図II(2.2)-1に示す。

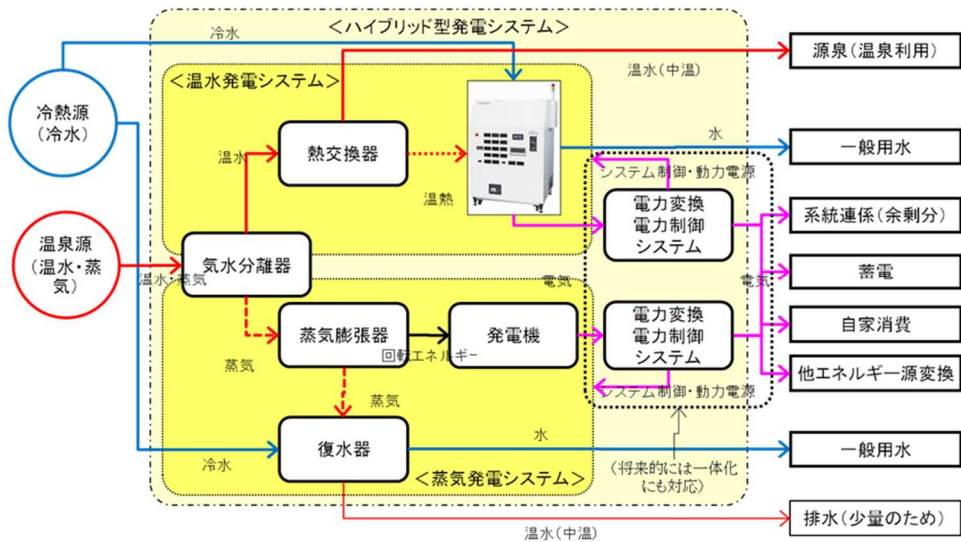


図 II (2.2)-1 機器開発のイメージ

○ 実用的温水発電システムの開発＝スケール対策を施した熱交換器の開発

温水発電システムにおいては、『スケール・腐食対策を施した熱交換器』の研究開発を行う。

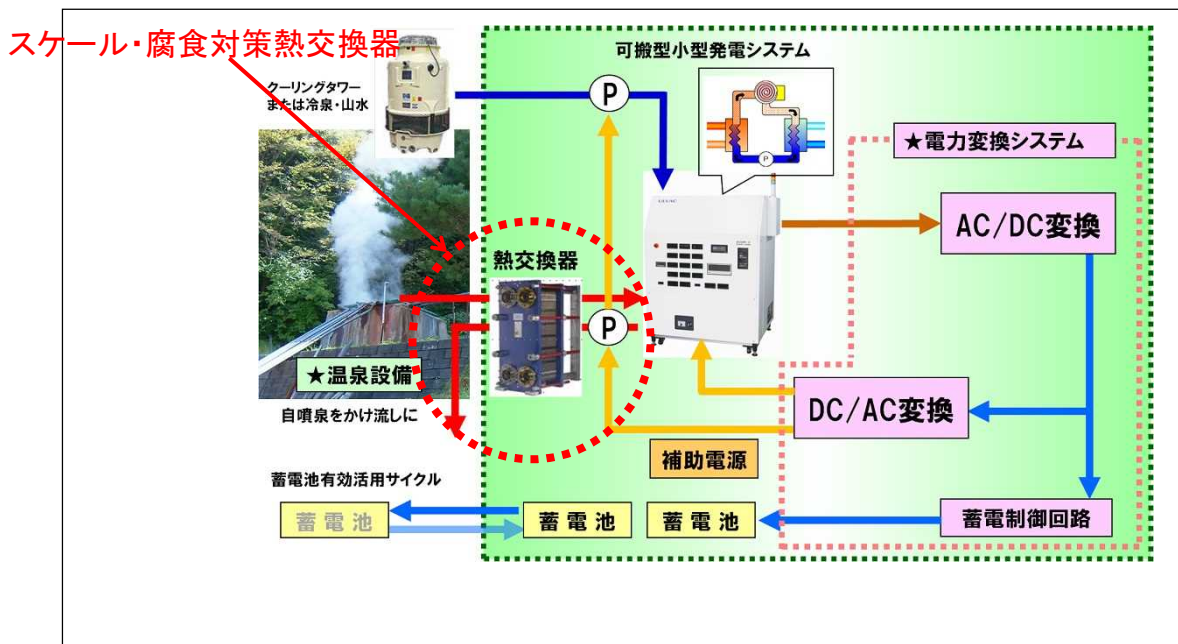


図 II (2.2)-2 温水発電システムの概要と機器開発

○ 実用的蒸気発電システムの開発

蒸気発電システムにおいては、下記の3つの機器の研究開発を行う。

- ・ 『小型のスクロール型蒸気膨張機による発電機の開発』
- ・ 『復水器＝発電機の効率化のため小型・真空型の復水器の開発』
- ・ 『気水分離器＝温水発電との併用の前提となる温水と蒸気の高効率&小型気水分離器の開発』

表Ⅱ(2.2)-1 研究内容と役割分担

研究開発テーマ		機器開発	担当事業者
①実用的温水発電システムの開発	<ul style="list-style-type: none"> 温水発電システムの腐食・スケール対策を講じた熱交換器の開発 ⇒ サンプル分析/スケール付着メカニズム/物性の解明 メンテナビリティとローコスト化 	熱交換器開発	馬淵工業所
②-1実用的蒸気発電システムの開発(Phase-1)	<ul style="list-style-type: none"> 蒸気発電システムの一次試作(課題の抽出) 	膨張機開発	アドバンス理工
		復水器開発	アドバンス理工
		気水分離器開発	馬淵工業所
②-2実用的蒸気発電システムの開発(Phase-2)	<ul style="list-style-type: none"> 蒸気発電システムの二次試作(一次試作機の課題を解決) メンテナビリティとローコスト化 	膨張機開発	アドバンス理工
		復水器開発	アドバンス理工
		気水分離器開発	馬淵工業所
③温水・蒸気併用ハイブリッド型発電システムの開発	<ul style="list-style-type: none"> ハイブリッド発電システムの実証試験 ハイブリッド化の気水分離の最適化 電力制御システム化 メンテナビリティとローコスト化 	統合化 実証実験	アドバンス理工 馬淵工業所

① 実用的温水発電システムの開発

・ 温水発電システムの腐食・スケール対策を講じた熱交換器の開発(担当：株式会社馬淵工業所)

(i) 腐食状況の確認及びスケールの現場での付着実験(担当：株式会社馬淵工業所)

鳴子温泉現地において、実際の腐食・スケール付着状況についての分析を行う。既存の類似実機を実証実験場所に設置し、腐食・スケール付着実験を行う。配管素材の違いによる状態と経時変化に伴う変化を分析するためのサンプルを採取する。

(ii) 腐食・スケール付着物性分析(担当：株式会社馬淵工業所)

上記(i)によって採取されたサンプルを分析し、腐食、スケールの付着メカニズム、その物性等についての解明を図る。

(iii) 腐食・スケール付着対策の検討と熱交換器の設計要件の確定・設定(担当：株式会社馬淵工業所)

上記(ii)の結果により、今後の維持管理の方法を踏まえ、熱交換器の素材、表面処理等の方向性についての検討を行い、熱交換器の設計の基本要件の確定・設定を行う。分析・検討結果によって、(i)(ii)のプロセスを再度実行する。

(iv) 熱交換器の設計・試作(担当：株式会社馬淵工業所)

上記(iii)の結果を用いて、形状検討、素材の選定、表面処理等についての設計・試作を行う。

(v) 熱交換器の評価＝維持管理性能評価(担当：株式会社馬淵工業所)

開発した機器の評価を行う。評価項目については、事業性に大きく影響する耐用年数を重点として、経時による耐腐食、耐スケール付着性能、および維持管理の容易性についての評価を実施する。

(vi) 耐腐食性の高い可搬型小型発電システムの筐体の検討(担当：アドバンス理工株式会社、株式会社馬淵工業所)

腐食性ガス等からの曝露による機器・システムの故障・腐食等の影響を防ぐため、腐食性ガス等からの曝露を防ぐ構造や高耐腐食性の材料の採用等、筐体の検討・設計を行う。

(vii) 導入、維持管理コストの評価(担当：株式会社馬淵工業所、アドバンス理工株式会社)

上記(v)の結果に基づき、導入コスト、維持管理コストについての検討を行う。必要に応じてローコスト化の検討を行い、事業収支上の損益分岐点の算出等により最適なコストを見出す。

②-1 スクロール型蒸気膨張機と実用的蒸気発電システムの開発(Phase-1)

・スクロール型蒸気膨張機による蒸気発電システムの一次試作(担当：アドバンス理工株式会社)

(i) スクロール型蒸気膨張機による発電システムの一次試作の設計・検討(担当：アドバンス理工株式会社)

蒸気発電システムを使用する場所の蒸気の温度・圧力より、スクロール型蒸気発電システムのサイクルを設計し、各構成部品の検討を行う。各構成部品は、スクロール型蒸気膨張機と発電機、気水分離器、復水器である。また、蒸気発電システムの各構成部品を3D-CADでモデリング後、各構成部品のモデリングを組み合わせて、実証試験に用いる蒸気発電システムの外観等のモデリングを行い、各構成部品の配置などの検討を行う。

(ii) スクロール型蒸気膨張機と発電機の一次試作の設計・製作(担当：アドバンス理工株式会社)

上記(i)において、設計・検討を行った蒸気発電システムのスクロール型蒸気膨張機と発電機の設計・製作を行う。蒸気膨張機の設計は、スクロールの設計、駆動部の設計を行う。スクロールの設計は、蒸気発電システムを使用する場所の蒸気の温度・圧力から、仕様を決定し、計画図を作成する。この計画図をもとに、3D-CADを用いて、スクロール部、駆動部の各部品のモデリングを行う。モデリングした各部品の加工を行うために、加工図の作成を行う。加工図をもとに各部品の製作を行い、蒸気膨張機を組み立てる。また、発電機は、1~3kWの出力範囲で適用可能な仕様で製作を行う。製作した発電機と蒸気膨張機を組み合わせ、動作確認を行い、単体試験を行う。単体試験は、空気を用いた圧縮試験を行い、吐出圧力が上がることを確認し、内部漏れが無いか確認を行う。

(iii) 気水分離器の一次試作の設計・製作(担当：株式会社馬淵工業所)

上記(i)において、設計・検討を行った蒸気発電システムの気水分離器の設計・製作を行う。気水分離器の設計・製作では、まず、市販の気水分離器の選定を行う。実際の蒸気発電システムに注入する蒸気を用いて、選定を行った市販の気水分離器から吐出される蒸気の圧力・流量等の評価を行う。この評価をもとに、気水分離器の最適な仕様設計を行う。この仕様設計をもとに、気水分離器製作メーカーと打合せを行い、蒸気発電システム用の気水分離器の一次試作を行う。

(iv) 復水器の一次試作の設計・製作(担当：アドバンス理工株式会社)

上記(i)でのスクロール型蒸気膨張機発電システムの設計・検討に基づき、復水器の設計・製作を行う。復水器の設計・製作では、まず、市販の熱交換器の選定を行う。実際の蒸気発電システムに注入する蒸気を用いて、選定を行った熱交換器の評価を行う。この評価をもとに、復水器の最適な仕様設計を行う。この仕様設計をもとに、復水器製作メーカーと打合せを行い、蒸気発電システム用の復水器の一次試作を行う。

(v) スクロール型蒸気膨張機による発電システムの一次試作・動作確認(担当：アドバンス理工株式会社)

上記(ii)(iii)(iv)にて設計・製作を行ったスクロール型蒸気膨張機、気水分離器、復水器を(i)で検討した蒸気発電システムの各構成部品の配置にしたがい、組立を行う。その後、スクロール型膨張機と蒸気発電システムの動作確認を行う。

(vi) 一次試作：スクロール型膨張機による蒸気発電システムの性能評価(担当：アドバンス理工株式会社)

上記(v)で試作したスクロール型蒸気膨張機の性能と発電システムの性能評価を行う。蒸気発電システムの性能は、蒸気の状態を温度100~150℃、膨張機入口圧力0.2~0.4MPaの間で変更し、電球負荷を用いて、1~3kWの出力が可能なかを評価する。

(vii) スクロール型蒸気膨張機による発電システムの二次試作の検討(担当：アドバンス理工株式会社)

上記(vi)で行った性能評価をもとに、二次試作蒸気発電システムの蒸気膨張機の構造の検討、気水分離器の仕様検討、復水器の仕様検討を行う。(vi)で行った性能評価において、実験室で、電球負荷を用いて、1~3kWの出力が可能となった場合には、実証試験機の検討を行う。

②-2 スクロール型蒸気膨張機と実用的蒸気発電システムの開発(Phase-2)

・スクロール型蒸気膨張機による発電システムの二次試作(担当：アドバンス理工株式会社)

(i) スクロール型蒸気膨張機による発電システムの二次試作の設計(担当：アドバンス理工株式会社)

上記②-1(vii)で行った検討をもとにして、一次試作蒸気発電システムを改良した二次試作ス

ロール型蒸気膨張機による発電システムの設計を行う。また、二次試作のスクロール型蒸気膨張機による発電システムの各構成部品を3D-CADでモデリング後、各構成部品のモデリングを組み合わせて、実証試験用の蒸気発電システムのモデリングを行う。

- (ii) スクロール型蒸気膨張機による発電機の二次試作の設計・製作(担当：アドバンス理工株式会社)
上記②-1(vii)において、検討を行った二次試作スクロール型蒸気膨張機発電システムのスクロール型蒸気膨張機と発電機の設計・製作を行う。一次試作のときと同様、蒸気膨張機の設計は、スクロールの設計、駆動部の設計を行う。スクロール型蒸気膨張機の設計は、蒸気発電システムを使用する場所の蒸気の温度・圧力から、仕様を決定し、計画図を作成する。この計画図をもとに、3D-CADを用いて、スクロール部、駆動部の各部品のモデリングを行う。モデリングした各部品の加工を行うために、加工図の作成を行う。加工図をもとに各部品の製作を行い、蒸気膨張機を組み立てる。発電機の二次試作は、一次試作の性能評価試験により、問題がある場合、再製作を行う。発電機とスクロール型蒸気膨張機を組み合わせ、動作確認を行い、単体試験を行う。単体試験は、空気を用いた圧縮試験を行い、吐出圧力が上がることを確認し、内部漏れが無いことを確認を行う。
- (iii) 気水分離器の二次試作の設計・製作(担当：株式会社馬淵工業所)
上記②-1(vii)において、設計・検討を行った二次試作スクロール型蒸気膨張機発電システムの気水分離器の設計・製作を行う。気水分離器の二次試作の設計・製作では、一次試作の性能評価をもとに気水分離器製作メーカーと打合せを行い、実際の蒸気を使用するための問題点を解決した改良を行う。改良を行った気水分離器の二次試作単体で、実際の蒸気を用いて性能を評価する。
- (iv) 復水器の二次試作の設計・製作(担当：アドバンス理工株式会社)
上記②-1(vii)において、検討を行った二次試作スクロール型蒸気膨張機発電システムの復水器の設計・製作を行う。復水器の二次試作の設計・製作では、一次試作の性能評価をもとに復水器製作メーカーと打合せを行い、実際の蒸気を使用するための問題点を解決した改良を行う。改良を行った復水器の二次試作単体で、実際の蒸気を用いて性能を評価する。また、復水器は、使用する前に、真空状態にする必要がある。このため、開発する復水器を真空状態にする真空ポンプが必要となる。そこで、この復水器用の真空ポンプの製作も合わせて行う。
- (v) スクロール型蒸気膨張機による発電システムの二次試作・動作確認(担当：アドバンス理工株式会社)
上記(ii)(iii)(iv)で設計・製作を行ったスクロール型蒸気膨張機、気水分離器、復水器を(i)で検討した蒸気発電システムの各構成部品の配置にしたがい、組立を行う。その後、②-1(v)で製作した蒸気発生システムと二次試作のスクロール型蒸気膨張機発電システムを接続し、スクロール型蒸気膨張機の性能評価と発電システムの動作確認を行う。
- (vi) 二次試作：スクロール型蒸気膨張機による発電システムの性能評価(担当：アドバンス理工株式会社)
上記(v)で試作した蒸気発電システムの性能評価を行う。一次試作のときと同様、二次試作スクロール型蒸気膨張機発電システムの性能評価は、蒸気の状態を温度100～150℃、膨張機入口圧力0.2～0.4MPaの間で変更し、電球負荷を用いて、1～3kWの出力が可能かを確認する。
- (vii) スクロール型蒸気膨張機発電システム単体での実証試験(担当：アドバンス理工株式会社)
改良した二次試作蒸気発電システム単体を実際の蒸気が発生している現場に持ち込みスクロール型蒸気膨張機と発電機の性能評価試験を行う。性能評価は、実際の蒸気を用い、電球負荷を用いて、1～3kWの出力が可能かを確認する。

③ 温水・蒸気併用ハイブリッド型発電システムの開発

③-1 ハイブリッド発電システムの実証試験(担当：アドバンス理工株式会社)

- (i) ハイブリッドシステムの検討(担当：アドバンス理工株式会社、株式会社馬淵工業所)
上記②-2(vi)(vii)の評価をもとに、ハイブリッドシステムの検討を行う。
- (ii) ハイブリッドシステムの製作(担当：アドバンス理工株式会社、株式会社馬淵工業所)
上記(i)において、検討を行ったハイブリッドシステムの製作を行う。
- (iii) ハイブリッドシステムの実証性能試験(担当：アドバンス理工株式会社)
上記(ii)で試作したハイブリッドシステムを実際の蒸気が発生している現場に持ち込み、性能評

価試験を行う。性能評価は、実際の蒸気において、電球負荷を用いて、1~6kWの出力が可能かを確認する。実証性能評価試験の結果からハイブリッドシステムの検討を行う。この検討では、ハイブリッド化した場合における気水分離器の最適値の探索、最適なシステムの配管等を検討する。同時に、システムの耐用年数も明らかにする。

③-2 流量制御によるスケール調査とハイブリッド発電の最大化

・特殊な機器でのスケール対策が不要となる温泉供給ラインからの採熱方法の確立と採熱方法に合わせた温泉蒸気分離方法と流量制御方法の確立。

(i) 採熱方法の確立(担当：株式会社馬淵工業所)

源泉直後、ガス抜き直後の温泉水で熱交換器へのスケール付着比較検討を行い、源泉毎に異なる温泉供給ラインに応じた最適な採熱方法を確立する。源泉から噴き出した直後にガスカート式プレート熱交換器を設置する。また源泉より大気開放して周辺湯気対策を施したガス抜きタンクに温泉水を引き、ガス抜き後の温水に熱交換器を設置してスケールの付着比較実験を行う。

ガス抜き用タンク内部を仕切り温泉水が貯留する仕組みとし、上記①(iv)(v)で評価・試作した浸漬型熱交換器を設置、維持管理性の検証も平行して行う。60日経過後に再試験を実施し、再現性を検証する。

(ii) 温泉蒸気分離方法の確立(担当：アドバンス理工株式会社)

温泉供給ラインに設置したバルブの調整で温水と蒸気流量比を変化させて、温水発電と蒸気発電の発電出力と発電効率の変化を把握することで流量比を最適化する。

④ 事業性・市場性の確保と向上

・事業性・市場性確保のための検討と開発への反映(担当：アドバンス理工株式会社、株式会社馬淵工業所)

外部専門家との協働(コンサルタントへの委託等)による検討を実施する。

(i) 事業性検証

出力特性、初期導入コスト、維持管理コスト等の算出を行い、温泉事業者等が導入した場合の事業性の検証を行い、温泉事業者等の本システム導入に向けての事業上の課題の抽出とその解決策を見出す。

(ii) 市場性検証

上記にあわせて、導入先のニーズの把握、資金調達支援等についての検討を行い、温泉事業者等が本システムの導入を容易にする方策の検討を行い、本システムの市場性を向上させる。

(iii) 開発への反映

上記(i)(ii)の検証結果を、製品開発に反映する。加えて市場への試験的投入(実証機の公開等含む)により市場の反応を実際に確認すると同時に広報PRなどを行い、事業性・市場性向上の観点から、実験内容やスケジュールの調整・検討を実施する。

表Ⅱ(2.2)-2 研究開発目標と根拠

事業項目	開発目標	目標レベル設定の根拠
①温水発電システムの腐食・スケール対策を講じた熱交換器の開発	維持管理費の低減、稼働率 90%以上を実証。	発電による収益の 10%以内を事業上の限界費用として設定。また、事業者の既存人材の活用を為、容易な維持管理方法を想定
②-1 スクロール型蒸気膨張機による蒸気発電システムの一次試作	蒸気温度 100~150℃, 入口圧力 0.2~0.4MPa で、1~3kW の発電出力を得る。	温水発電システムと複合化する際に適した条件と能力から設定。
②-2 スクロール型蒸気膨張機による発電システムの二次試作		
③-1 ハイブリッド発電システムの実証試験	温水発電と蒸気発電で 1~6kW の発電出力を得る。5,000 千円/1 システムの実現。	導入による費用対効果から設定。
③-2 流量制御によるスケール調査とハイブリッド発電の最大化		
④事業性・市場性確保のための検討と開発への反映	導入コスト 5,000 千円/1 システム以下の事業シナリオ策定。	現状では導入に係る事業費が大きく、事業化が可能なシステムの検討が求められる為

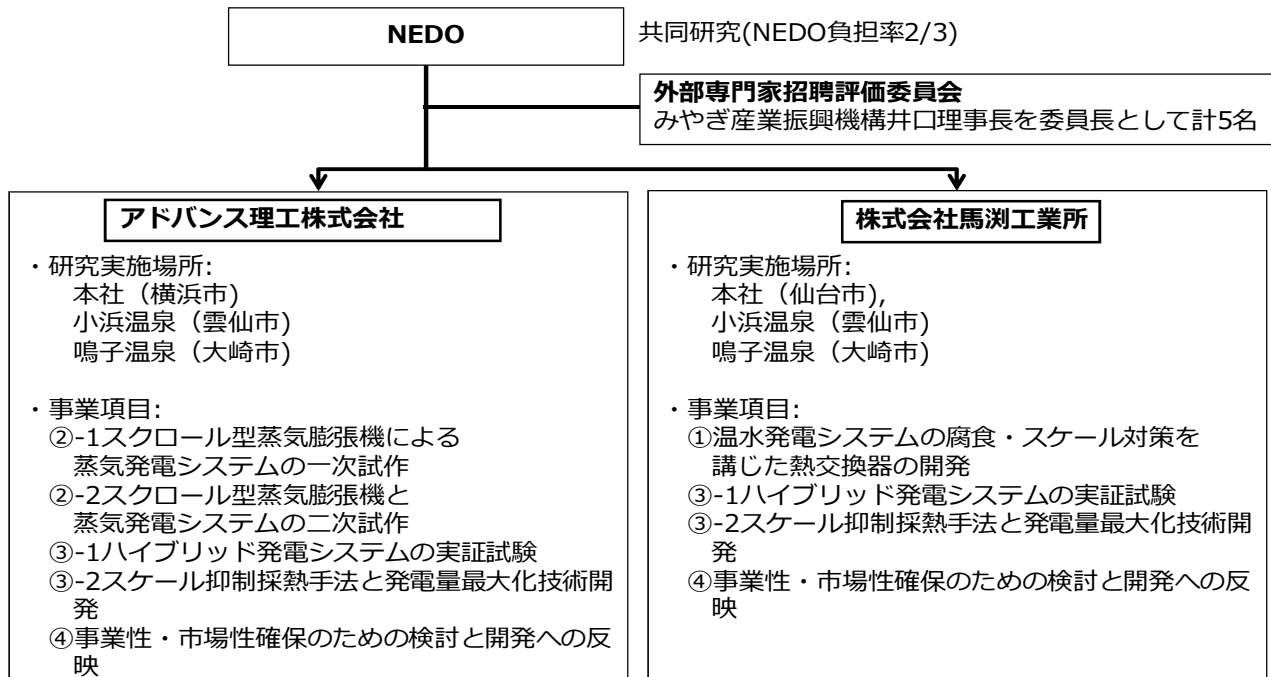
(2.2.3)事業スケジュール

本事業の研究期間は、平成25年9月2日より平成28年2月28日までで、主な事業スケジュールの概要を図Ⅱ(2.2)-3に示す。平成25年度後期から平成26年度にかけて温水発電システムの設置を鳴子温泉で行い、データ収集は平成26年7月まで実施した。蒸気発電システムの設置を小浜温泉に設置し実証実験を行った。研究開発進捗報告委員会は延べ11回実施し、外部専門家招聘評価委員会を3回開催した。

図Ⅱ(2.2)-3 研究開発のスケジュール

研究開発項目	25年度				26年度				27年度			
	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q
①温水発電システムの腐食・スケール対策を講じた熱交換器の開発			腐食・スケール付着 分析・対策		熱交換器の設計・試作・評価							
②スクロール型蒸気膨張機による蒸気発電システムの一次試作			一次試作		性能評価							
③スクロール型蒸気膨張機と蒸気発電システムの二次試作					二次試作		性能評価		実証試験			
④ハイブリッド発電システムの実証試験									設計・製作		実証性能試験	
⑤事業性・市場性確保のための検討と開発への反映			事業性・市場性検証・開発への反映									
⑥スケール抑制採熱手法と発電量最大化技術開発										実証試験		

(2.2.4)研究開発の実施体制



(2.2.5)研究開発の運営管理

温泉の蒸気と温水を有効活用し、腐食・スケール対策を施したハイブリッド型小規模発電システムの開発技術検討委員会

アドバンス理工株式会社(平成 26 年 12 月、アルバック理工株式会社から名称変更)
株式会社馬淵工業所

ア. 研究開発進捗報告委員会

担当	氏名 (敬称略)	所属
委員長	五戸 成史	アドバンス理工株式会社・代表取締役社長
副委員長	小野 寿光	株式会社馬淵工業所・代表取締役
委員	遠藤 聡	アドバンス理工株式会社・研究開発部 部長
委員	萬谷 清高	アドバンス理工株式会社・研究開発部 係長
委員	相良 宏	アドバンス理工株式会社・研究開発部 課員
委員	藤巻 慎一	アドバンス理工株式会社・研究開発部 課員
委員	矢部 敏仁	アドバンス理工株式会社・研究開発部 課員
委員	笹原 康介	アドバンス理工株式会社・研究開発部 課員
委員	飯高 佑一	アドバンス理工株式会社・研究開発部 課員
委員	中西 大	アドバンス理工株式会社・研究開発部 課員
委員	水上 貴志	株式会社馬淵工業所・環境事業部・工事部統括マネージャー
委員	相澤 直信	株式会社馬淵工業所・環境事業部 マネージャー
委員	菅原 洋一	株式会社馬淵工業所・メンテナンス事業部 統括マネージャー
委員	市川 俊雄	株式会社馬淵工業所・工事部 土木技術マネージャー
委員	松田 龍一	株式会社馬淵工業所・工事部 技術グループリーダー
委員	太田 忠吉	株式会社馬淵工業所・メンテナンス事業部 工務マネージャー
委員	大石 基也	株式会社馬淵工業所・工事部 課員
委員	熊谷 克彦	株式会社馬淵工業所・工事部 課員
委員	佐藤 智範	株式会社馬淵工業所・工事部 課員
委員	本村 幹男	株式会社馬淵工業所・環境事業部 課員
委員	寺野 悠二	株式会社馬淵工業所・環境事業部 課員
委員	永澤 宇翔	株式会社馬淵工業所・環境事業部 課員
委員	菅井 雄磨	株式会社馬淵工業所・環境事業部 課員
委員	前田 圭一郎	有限会社 GMP 創房・取締役
委員	須藤 理枝子	株式会社さがみはら産業創造センター(SIC)さがみはら表面技術研究所・所長

所属は、委員会組織時点のもの

イ. 外部専門家招聘評価委員会

担当	氏名 (敬称略)	所属
委員長	井口 泰孝	みやぎ産業振興機構理事長 東北大学名誉教授ほか・工学博士
副委員長	内海 康雄	仙台高等専門学校副校長・地域人材育成開発本部長・教授・工学博士
委員	村岡 洋文	弘前大学・教授・工学博士 北日本新エネルギー研究所所長
委員	前田 圭一郎	有限会社 GMP 創房・取締役
委員	須藤 理枝子	株式会社さがみはら産業創造センター(SIC)さがみはら表面技術研究所・所長

所属は、委員会組織時点のもの

Ⅲ. 研究開発成果について

①研究開発テーマ1：実用的温水発電システムの開発

・温水発電システムの腐食・スケール対策を講じた熱交換器の開発

(i) 腐食状況の確認及びスケールの現場での付着実験(担当：株式会社馬淵工業所)

鳴子温泉(宮城)および小浜温泉(長崎)の温泉施設の温泉水槽内に、ステンレス・樹脂・チタン材等合計12種の試験片を両現場でそれぞれ1ヶ月間浸漬し、スケールの付着状況を確認した。鳴子温泉・小浜温泉のいずれも材料依存することなく相当量のスケール付着が見られた。また、鳴子温泉の温泉施設内でのガスの調査、および金属材料の環境大気中への暴露試験を行った結果から、環境大気中の常時ガス濃度は、硫化水素210~650ppb、二酸化硫黄0~8ppb、塩化水素など0~5ppbと予測した。

(ii) 腐食・スケール付着物性分析(担当：株式会社馬淵工業所)

鳴子温泉の温泉施設内にある、貯湯槽連通管に付着したスケールに対して定性分析を行い、カルシウム・鉄・ケイ素・硫黄・ナトリウム等が含まれており、特にカルシウムが多く存在していた。

鳴子温泉の温泉施設にて、熱交換器を78ℓ/分で温泉水(温水)と井戸水(冷水)を3ヶ月間通水し熱交換器内のチタン製のプレートの状態を確認したところ、温泉水側は主に温泉に含まれる成分由来の硫化鉄が付着し黒変しており、井戸水側は井戸水に含まれる成分由来の酸化鉄が付着し茶変していた。しかし、スケールの付着による閉塞はなかった。

(iii) 腐食・スケール付着対策の検討と熱交換器の設計要件の確定・設定(担当：株式会社馬淵工業所)

スケール付着実験の結果を踏まえて、維持管理面よりプレート式熱交換器の内部清掃のコストが一般的な水道水利用よりも著しく増大する事が明らかとなり、メンテナンスの容易性からも投げ込み式熱交換器を基本設計の要件とした。耐腐食性・維持管理容易性・熱交換効率等を比較する為、複数の素材・形状の熱交換器を試作し、検討する方向性を確定した。

(iv) 熱交換器の設計・試作(担当：株式会社馬淵工業所)

(i)の腐食性ガス分析の結果から、硫化水素等による腐食に十分耐えうる素材として、SUS304・純チタン340・PPR(ポリプロピレン・ランダム共重合体)を選択した。形状については、維持管理性、コスト面から、フレキ管、直管、トラスコアパネルを採用し、熱交換器を設計・試作した。

(v) 熱交換器の評価＝維持管理性能評価(担当：株式会社馬淵工業所)

(iv)で試作した熱交換器を温泉施設で評価する予定である。

(vi) 耐腐食性の高い可搬型小型発電システムの筐体の検討(担当：アドバンス理工株式会社、株式会社馬淵工業所)

発電システムを鳴子温泉の温泉施設に設置し、7ヶ月間観察したが腐食は見られなかった。腐食性ガスが強いとみられる別の施設に移設し、7ヶ月間経過観察時点で発電機本体には、腐食は確認されなかったが、電子機器の端子台等、一部分に腐食が確認された。

(vii) 導入、維持管理コストの評価(担当：株式会社馬淵工業所、アドバンス理工株式会社)

鳴子温泉において、温水発電システムを設置する際に必要となる付帯設備の費用を算出し、導入時のコストについて予備的評価をした。

②-1 スクロール型蒸気膨張機と実用的蒸気発電システムの開発(Phase-1)

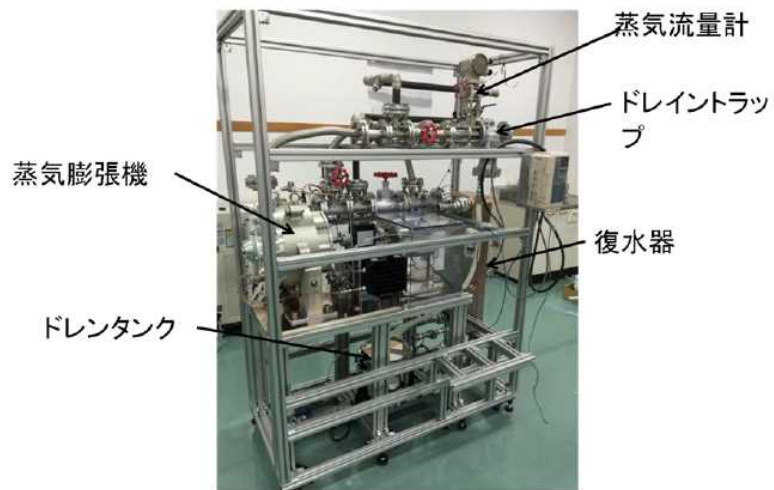
・スクロール型蒸気膨張機による蒸気発電システムの一次試作

(i) スクロール型蒸気膨張機による発電システムの一次試作の設計・検討(担当：アドバンス理工株式会社)

スクロール型蒸気膨張機による蒸気発電システム(以下システムという)の一次試作の設計・検討では、システムを使用する場所の蒸気の温度・圧力より、システムのサイクルを設計し、

各構成部品の検討を行った。次に、サイクル検討を行った温度条件から発電電力のシミュレーションを行い、発電端電力において、最高2.5kWとなることを確認した。システムに蒸気を投入する際に、蒸気に水分が多く混入すると蒸気膨張機が故障する原因になると考えられるため、気水分離器を設置することとし、一次試作機として市販のものを選定した。復水器の一次試作は、システムの出口温度が40～50℃になるように、交換熱量が約50kWの市販の熱交換器を検討した。以上の検討結果から、スクロール型蒸気膨張機による発電システムの一次試作のフロー図を作成した。フロー図を基に、蒸気発電システムの全体と各構成部品のモデリングを3D-CADを用いて行った。

- (ii) スクロール型蒸気膨張機と発電機の一次試作の設計・製作 (担当：アドバンス理工株式会社)
スクロール型蒸気膨張機の一次試作の設計製作では、(i)の設計・検討を基に、計画図を作成し、3D-CADによりモデリングを行った。作成したモデリングからスクロール型蒸気膨張機の各構成品の加工図を作成し、部品加工を行い、加工部品を組み立てた。組み立てたスクロール型蒸気膨張機の単体の空気圧縮性能試験を行い体積効率、及び全断熱効率を評価したところ、体積効率は90%、全断熱効率は60%であり、体積効率及び全断熱効率とも目標値を達成した。このことから、内部漏れがないこと、吐出圧力が設計仕様通りに製作できたことがわかった。また、発電機は、 3000min^{-1} で約2.5kWの発電出力のものを採用することとした。
- (iii) 気水分離器の一次試作の設計・製作 (担当：株式会社馬淵工業所)
気水分離器の設計を行った。サイクロン方式で3種類の外周ガイドと3種類の内筒を設計・製作し、最適な形状の組み合わせを検証した。蒸気と液体を効率的に分離し、市販気水分離器で安定しなかった電力波形が、一次試作機の気水分離器を使うことで安定化した。
- (iv) 復水器の一次試作の設計・製作 (担当：アドバンス理工株式会社)
復水器の一次試作では、(i)で計算した交換熱量、約50kWに近い市販の熱交換器(交換熱量が約63kW)を採用し、一次試作の蒸気発電システムに組み込んだ。
- (v) スクロール型蒸気膨張機による発電システムの一次試作・動作確認 (担当：アドバンス理工株式会社)
(ii)より、1)製作したスクロール型蒸気膨張機、2)発電機の一次試作、3)市販の気水分離器(*1蒸気トラップ内臓)、及び4)熱交換器を蒸気発電システムに組み込み、ガス炊きボイラの蒸気を用いて動作確認を行った。ボイラで作った蒸気により、発電し、電球負荷を点灯することを確認した。
- (vi) 一次試作：スクロール型膨張機による蒸気発電システムの性能評価 (担当：アドバンス理工株式会社)
スクロール型蒸気膨張機による蒸気発電システムの一次試作の性能評価は、復水器出口を大気開放し、試験を行った。発電出力、体積効率、全断熱効率は、それぞれの2.3 kW、90%、60%となり目標値を達成した。
- (vii) スクロール型蒸気膨張機による発電システムの二次試作の検討 (担当：アドバンス理工株式会社)
(vi)において、一次試作蒸気発電システムは、性能が十分に発揮できていることを確認したため、二次試作では、一次試作の基本的な構造を変更しないまま用いることとし、小型化・簡素化を検討した。

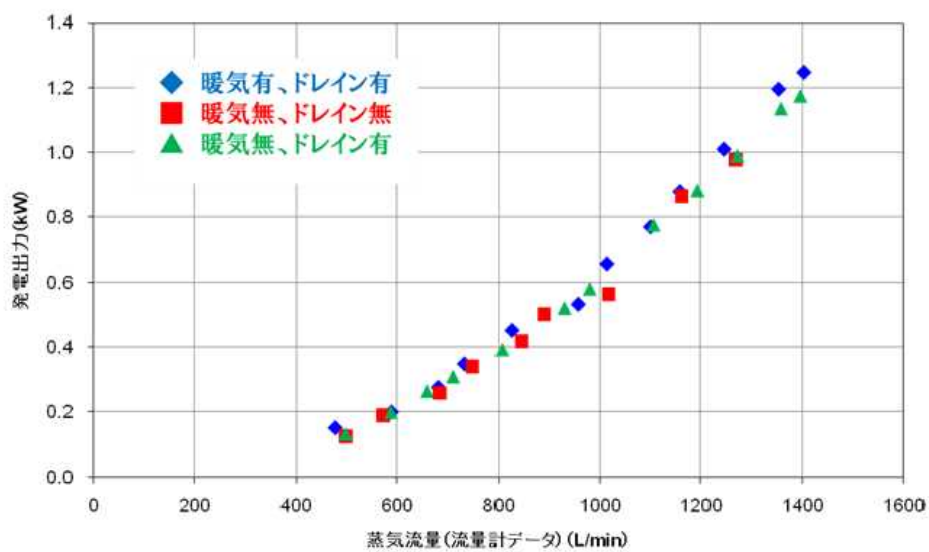


図Ⅲ(2.2)-1.製作した1次試作機の蒸気発電システム



図Ⅲ(2.2)-2.設置した一次試作の気水分離器機

発電出力



図Ⅲ(2.2)-3.発電出力の蒸気流量依存性 (一次試作)

②-2：スクロール型蒸気膨張機と実用的蒸気発電システムの開発(Phase-2)

・スクロール型蒸気膨張機による発電システムの二次試作

(i) スクロール型蒸気膨張機による発電システムの二次試作の設計(担当：アドバンス理工株式会社)

②-1(vii)の検討において、復水器のサイズの小型のものを選定し、モデリングを行った。一次試作よりもサイズが小型な復水器を選定し、不要なバイパス配管を取り除き、シンプルな構造とした結果、全高で30%低減することが可能となった。二次試作のフロー図を作成しなおし、3D-CADを用いて、モデリングを行った。

(ii) スクロール型蒸気膨張機による発電機の二次試作の設計・製作(担当：アドバンス理工株式会社)

②-1(vi)において、基本的な構造において、十分な性能を発揮できることを確認したので、更に性能向上を目的にシール構造の最適化、並び材質の検討を行った。

(iii) 気水分離器の二次試作の設計・製作(担当：株式会社馬淵工業所)

小浜温泉の温泉施設にて、自噴源泉(噴出圧約0.2MPa)の蒸気(流量約1000ℓ/min)による~~による~~気水分離器の性能評価を行った。気水分離器周辺配管の設計を含めて、圧力損失の少ない形での蒸気の取出しについて改良を重ね、サイトグラスにより蒸気が分離できていることを確認した。結果として発電出力が増大した。

(iv) 復水器の二次試作の設計・製作(担当：アドバンス理工株式会社)

熱交換熱量が同等でサイズが小型の復水器を選定した。二次試作の蒸気発電システムにこれを組み込んだ。

(v) スクロール型蒸気膨張機による発電システムの二次試作・動作確認(担当：アドバンス理工株式会社)

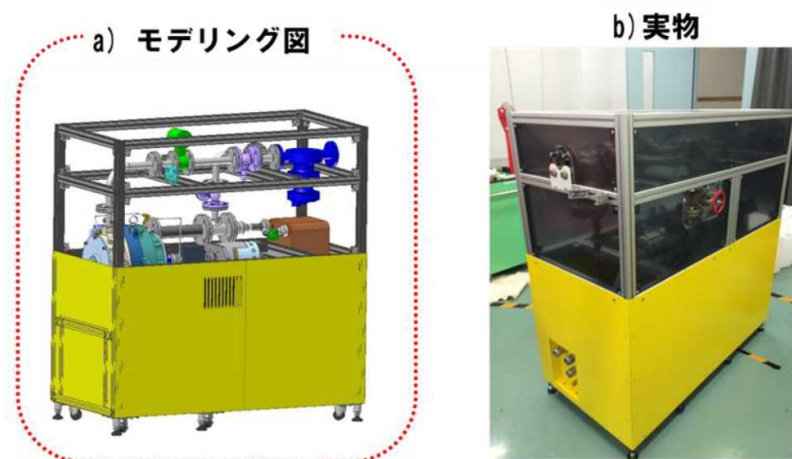
二次試作蒸気発電システムの動作確認を一次試作同様に、ガス炊きボイラの蒸気を用いて行った。ボイラで作った蒸気により、発電し、電球負荷を点灯することを確認した。

(vi) 二次試作：スクロール型蒸気膨張機による発電システムの性能評価(担当：アドバンス理工株式会社)

小型化した二次試作の性能評価を行い、発電出力、体積効率、及び全断熱効率を評価した。発電出力は約2.3kWであり、体積効率は90%であり、全断熱効率、60%付近まで到達し、全て目標値を達成した。

(vii) スクロール型蒸気膨張機発電システム単体での実証試験(担当：アドバンス理工株式会社)

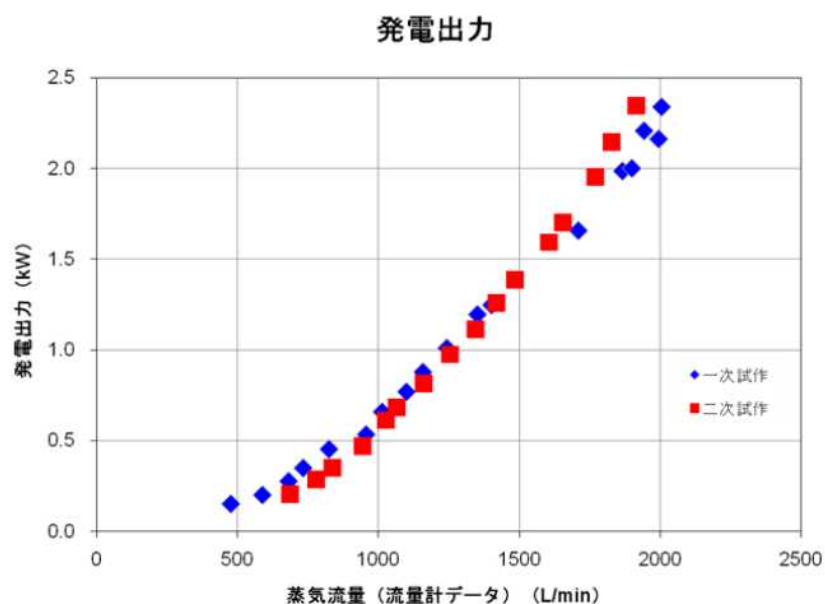
計画を前倒して、蒸気発電システム単体の実証試験を長崎県の小浜温泉にて、実施した。まず、源泉の蒸気が気水分離器を通すことにより、湯き蒸気となることを確認した。その後、蒸気発電システムに源泉の蒸気を投入し、発電し、電球負荷が光ることを確認した。



図Ⅲ(2.2)4.蒸気発電システムの二次試作の左)モデリング図/右)実機



図Ⅲ(2.2)-5.左)二次試作機外観 右)二次試作機蒸気流入部



図Ⅲ(2.2)-6.発電出力の蒸気流量比依存性(二次試作)

③-1研究開発テーマ3：温水・蒸気併用ハイブリッド型発電システムの開発

- (i) ハイブリッドシステムの検討(担当：アドバンス理工株式会社、株式会社馬淵工業所)
ハイブリッドシステムを検討するのに先立ち、電力変換装置開発のロードマップを作成した。また、小浜温泉で行う実証実験の方法の検討を行った。
- (ii) ハイブリッドシステムの製作(担当：アドバンス理工株式会社、株式会社馬淵工業所)
ハイブリッドシステムを製作した。熱水タンクの中には熱交換器として採用したフレキシブルチューブ (20 m) を3本挿入した。
- (iii) ハイブリッドシステムの実証性能試験 (担当：アドバンス理工株式会社)
温泉地 (小浜温泉) での実証試験において、熱交換器の稼働率および、熱効率を評価した。

絶対圧で0.205 MPa、温度120°Cの混合温泉蒸気と温泉水を二次試作機の気水分離器を使用して、温泉蒸気と温泉水に分離した。温泉蒸気は、圧力0.205 MPa、温度120°Cの蒸気が流量71.8m³/hを分離することができた。この分離した蒸気で蒸気発電を行い、発電出力は1.2 kWであった。ここから、軸出力を算出し、発電効率を計算すると46.6%であった。

温水発電の方は、蒸気発電のドレイン水と温泉水を温泉タンクにいったん溜めたものを利用して発電を行った。温泉タンクには、投げ込み式の熱交換器としてフレキシブルチューブを利用し

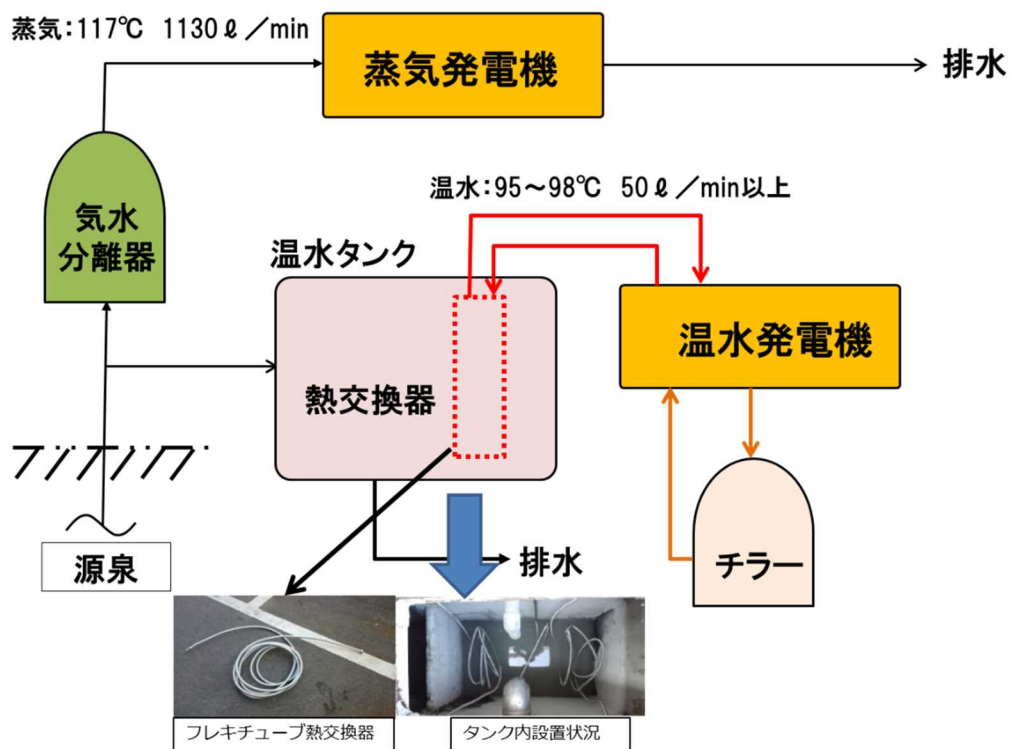
た。フレキシブルチューブの中に水を導入し、フレキシブルチューブを水が通過するときに温泉水の熱と熱交換をし、90℃以上の高温熱水を安定的に得ることができた。温水発電の方も安定的に3 kW程度1ヶ月間ではあるが発電をすることができた。12月～1月の真冬の時期ではあるが、この期間の典型的な一例として、最大出力に近いところで温水発電の効率を計算すると6.3%であった。12月～1月の真冬の時期では、温水発電の送電端出力に対する発電効率は5.3～6.3%であった。

ハイブリッド発電システムで、蒸気発電、温水発電のそれぞれの送電端出力に対する発電効率は、蒸気発電の発電効率は2.6%であり、温水発電の発電効率は5～6%であったので目標を達成することができた。

実証試験において、温水発電機は1か月以上の連続運転が可能であることが実証された。用いた熱交換機については36日間、メンテフリーで性能が出ることが確かめられた。

* 熱交換器に詰まりが無く、温水発電の運転に必要な既定以上の熱を熱交換できている日数で算出している。

稼働率95%以上ということなので、1ヶ月単位で見れば30日間(1ヶ月) × 目標稼働率95% = 28.5日(1.5日/月以下のメンテナンス頻度)ということになるので、1ヶ月のうちでメンテナンス日数約1.5日であればこの目標値をクリアすることになる。今回用いた熱交換器は簡便なSUSパイプで、外管に付着したスケールを水による洗浄レベルで、比較的簡単に除去出来るメリットがあるため、1.5日でのメンテナンス日数は充分可能である。従って今回用いた熱交換器の稼働率は目標値を達成している。



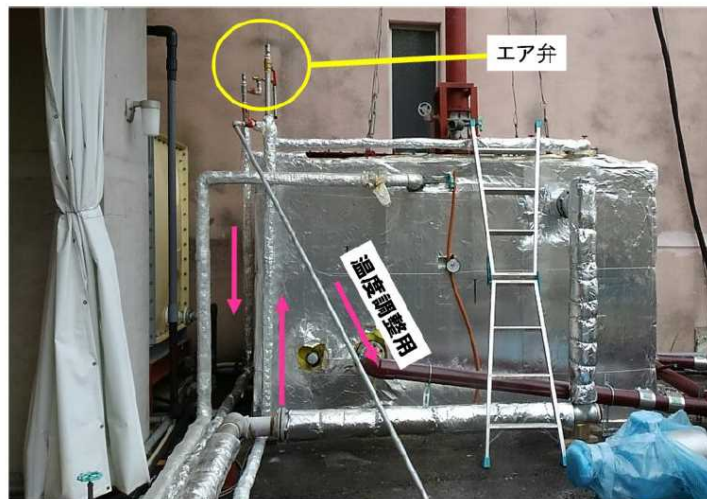
図Ⅲ(2.2)-7.ハイブリッド発電の設置模式図



図Ⅲ(2.2)-8.気水分離器と蒸気発電システム



図Ⅲ(2.2)-9.小浜温泉に設置した温水発電システム



図Ⅲ(2.2)-10.小浜温泉に設置した熱水タンク

④事業性・市場性の確保と向上

・事業性・市場性確保のための検討と開発への反映

(i) 事業性検証

事業性について「コストの把握、低価格化の要素の抽出」、「低価格化技術要素の抽出と対応技術検索」[→](#)によって、検証を行った。また、事業性向上に向けて、先進地域での事業者インタビューを実施した。調査・検証の結果、事業性に直結するローコスト化に焦点をあて、事業者側の使い勝手を反映した設備の簡素化が必要であることが示され、今後の技術課題を絞り込んだ。

(ii) 市場性検証

インタビュー等を通じて、事業者から本システムの導入意向が示されるなど、小型・分散型を特徴とする本システムが高い市場訴求力を有する可能性があることが確認された。特に小規模の温泉宿泊施設事業者の関心が高いことが示された。

(iii) 開発への反映

上記のインタビュー・検討等により、事業化に向けての一定の可能性を確認した。調査により得られたローコスト化(簡素化)の可能性検証により事業化に向けてのコスト目標値を示し、開発にあたっての目標のひとつとして反映した。

表Ⅲ(2.2)-1 特許、論文、外部発表等

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表		
	国内	外国	PCT※ 出願	査読 付き	その 他	学会発表・ 講演	新聞・雑誌等 への掲載	その他
H25FY	0件	0件	0件	0件	0件	0件	0件	0件
H26FY	0件	0件	0件	0件	0件	2件	1件	5件
H27FY	0件	0件	0件	0件	0件	0件	0件	0件
H28FY	0件	0件	0件	0件	0件	0件	1件	0件
H29FY	0件	0件	0件	0件	0件	0件	0件	1件

(※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約)

[最終目標に対する成果と達成度]

表Ⅲ (2.2)-2 最終目標に対する成果と達成度

事業項目	開発目標	成果	達成見込
①温水発電システムの腐食・スケール対策を講じた熱交換器の開発	維持管理費の低減、熱交換器稼働率 90%以上の実証	稼働率 95%以上を達成	○ (達成)
②スクロール型蒸気膨張機による蒸気発電の一次試作	ボイラの蒸気において、発電出力 1~3kW を達成	最大出力 1~2kW を達成	○ (達成)
③スクロール型蒸気膨張機による発電システムの二次試作	温泉の蒸気による発電出力 1~3kW を達成	ボイラーにより最大発電出力 4kW を達成 (温泉蒸気は蒸気不足により 1.2kW 止まり)	△ (蒸気があれば可能)
④ハイブリッド発電システムの実証試験	温泉発電と蒸気発電で発電出力 3kW~5kW を達成	気水分離機製作済 温泉発電で発電出力 3.2kW 蒸気発電で発電出力 1.2kW 合計出力 4.4kW ⇒ 目標である発電出力 : 3kW~5kW を達成	○ (達成)
⑤事業性・市場性確保のための検討と開発への反映	①出力特性、初期導入コスト、維持管理コストなどの算出により事業性の検証を行う ②事業性の検証に基づき企業へのインタビューを行い市場を獲得する上での方向性を示す ③事業性/市場性の検討に基づき今後の開発の方向性を示す	①事業収支の検証のために、複数ケースの設定を行ったシミュレーションの結果 ・最大発電量に対する稼働率が 80%以上であれば、システム価格は現状で可 ・最大発電量に対する稼働率が 60%以上であればシステム価格は現状の 50%にする必要 ということが求められる ②小規模・分散型を特徴とする本システムが高い訴求力を有する可能性があること、地熱以外の排熱利用に加えての市場を想定する必要があること、環境系ファンドを狙った市場の獲得が必要という方向性 ③開発に対する方向性としては、 ・ローコスト化 ・システムのモジュール化 ・社会的貢献を目指す投資家からの出資がまとめとして挙げられる	○ (達成)
⑥特殊な機器でのスケール対策が不要となる温泉供給ラインからの採熱方法の確立と採熱方法に合わせた温泉蒸気分離方法と流量制御方法を確立する	熱交換器の稼働率 : 95%以上 熱効率 : 7.0%以上	稼働率 95%以上 蒸気発電の送電端出力に対する発電効率は 2.6% (実証試験において)、3.3% (実験室内) を達成 12月~1月の真冬の実証試験にて、温水発電の発電効率は 5.3~6.3% を達成 両者ともに目標である発電効率 7%以上は未達	△ (一部達成)

IV. 実用化に向けての見直し及び取り組みについて

蒸気発電については、システムの抜本的な見直しが必要であり、現実として温泉地での蒸気量が不足しているために温泉地での蒸気発電実用化は困難であると判断する。

しかしながら、本プロジェクトで開発した蒸気発電のノウハウは、蒸気発電機のハード及び発電システム構築のための新規開発が条件であるものの、温泉地だけでなく他の蒸気を用いた発電として利用することが可能である。

また、温水発電は発電量に見合う十分なコストダウンを実現できれば、本プロジェクトによる熱交換器などの実証試験により実用化が可能である。事業性の確立及び市場への浸透のために、コストダウンの内容として2017年～2019年にかけて以下の開発を継続する。

- ① 機器設備の価格低減 ⇒ システム全体の簡略に向けた見直し
 - ・ コンポーネントのミニマム化による性能実現
 - ・ 高額コンポーネントの内製化
- ② 維持管理費用の低減 ⇒ 耐久性部品／コンポーネントの見直し
 - ・ 耐久性部品及びコンポーネントの採用によるメンテ作業の軽減
- ③ 低価格(電力変換+蓄電)システムの確立 ⇒ 内製化
 - ・ シンプルな電力供給システムの構築と、高額な蓄電システムのコストダウン

上記開発の成果に基づき、2019年～2020年で市場へリリースする見直しである。

個別テーマ(2.3)

(2)低温域の地熱資源有効活用のための小型バイナリー発電システムの開発

(2.3)スケール対策を施した高効率温泉熱バイナリー発電システムの研究開発

委託先:京葉プラントエンジニアリング株式会社

II. 研究開発マネジメントについて(事業の計画内容)

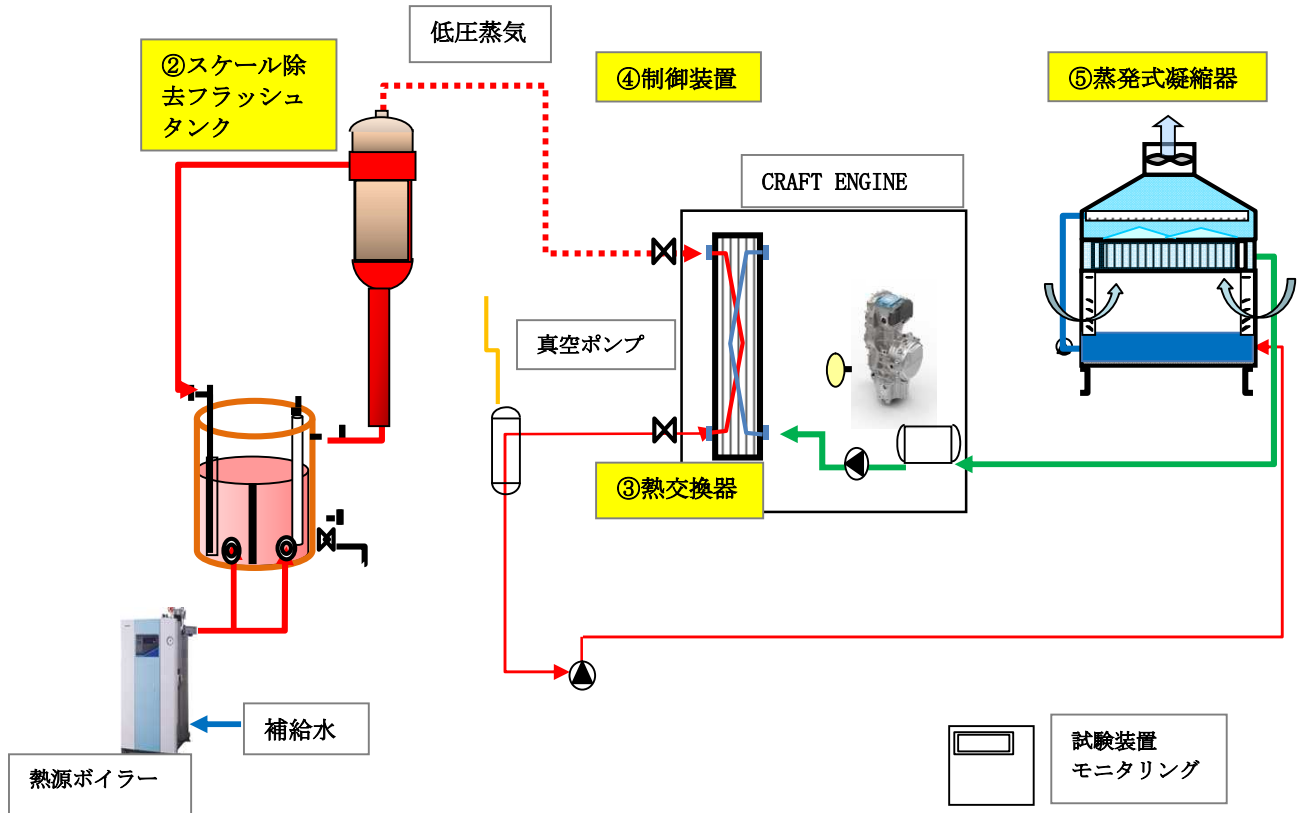
(2.3.1)背景と目的

近年、比較的温度の低い蒸気や熱水でも、低沸点媒体を熱変換して利用することで発電可能なバイナリー発電の導入が進みつつある。我が国では、低温地熱エネルギーの中でも温泉熱エネルギーが全国各地に分布し、温泉熱を発電に利用することで地域分散型の電源として活用できることから、バイナリー発電の導入拡大に資する技術開発を行うことを本事業の目的とする。

本事業では、低温域の地熱資源有効活用のための小型バイナリー発電システムの開発として、「スケール対策を施した高効率温泉熱バイナリー発電システムの研究開発」を実施する。

(2.3.2)研究開発の概要

- ①実現可能性調査の実施
- ②スケール除去フラッシュタンク開発
- ③高効率蒸気/冷媒熱交換器開発
- ④低圧蒸気制御システム開発
- ⑤蒸発式凝縮器開発
- ⑥性能試験



図II(2.3)-1 市川研究所試験機器フロー図

表Ⅱ(2.3)-1 研究開発目標と根拠

事業項目	開発目標	目標レベル設定の根拠
スケール除去フラッシュタンク	100℃温泉水を低圧58kPa程度で85℃蒸気を抽出し、スケール除去を可能にする。	多量に発生する大きな液滴を重力沈降で分離する事によりスケール成分の随伴を防ぐ。
高効率蒸気/冷媒熱交換器	低圧蒸気を取り入れて、冷媒と熱交換する。	蒸気の凝縮温度と冷媒の蒸発温度の差が 5℃ 以下、熱貫流率 1.7 kW/m ² K 以上の維持を可能にする。
低圧蒸気制御システム	低圧蒸気に含まれるイナータガスを排出、起動時に低圧を保つ。	30分以内に58kPa程度に減圧して運転を可能にする。
蒸発式凝縮器(コンパクトエバコン)	冷媒保有量を従来比1/10以下、凝縮温度を冷却水温度+3℃以下とする。	凝縮温度を冷却水温度+3℃以下にする。
発電効率(発電出力値-補機消費電力)/投入熱量	7%以上	バイナリー発電の経済性を担保するにはシステム発電効率を改善する事が必要である。

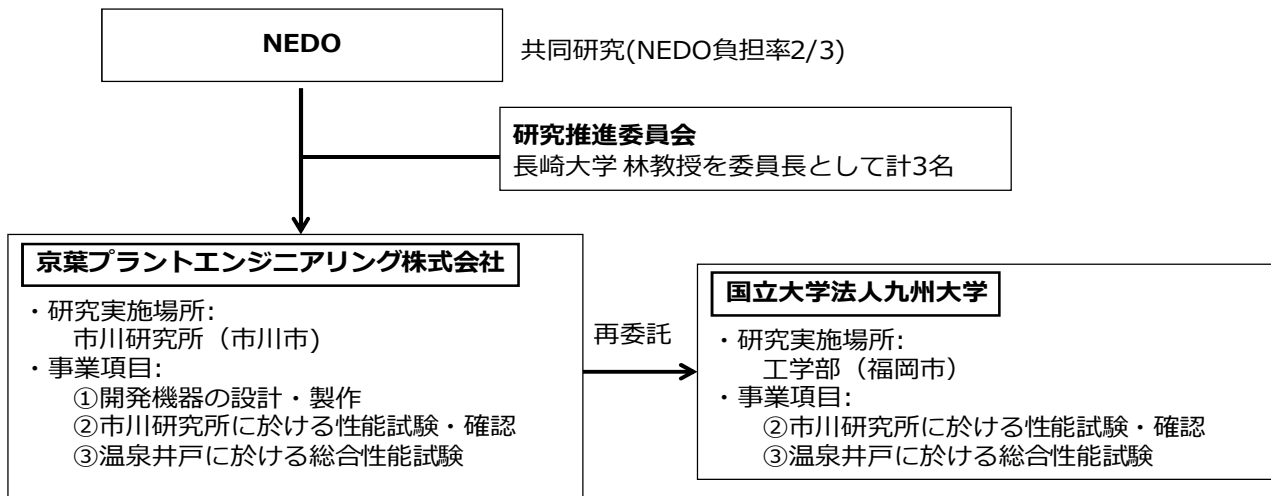
(2.3.3)事業スケジュール

本事業の研究期間は、平成26年8月8日より平成29年 3月までで、主な事業スケジュールの概要を図Ⅱ(2.4)-2に示す。平成26年度後期から平成27年度3月にかけて設備の詳細設計及び製作を行い、H28年度に温泉井戸での総合性能試験を実施した。研究推進委員会は合計5回実施した。

事業項目	平成 26 年度	平成 27 年度	平成 28 年度
開発機器の設計・製作	←→		
市川研究所に於ける性能試験・確認		←→	
温泉井戸に於ける総合性能試験			←→
研究推進委員会	◆	◆ ◆	◆ ◆

図Ⅱ(2.3)-2 研究開発のスケジュール

(2.3.4)研究開発の実施体制



(2.3.5)研究開発の運営管理

表 II (2.3)-2 スケール対策を施した高効率温泉熱バイナリー発電システムの研究開発 研究推進委員会
京葉プラントエンジニアリング株式会社

担当	氏名 (敬称略)	所属
委員長	林 秀千人	国立大学法人長崎大学 大学院工学研究科 教授
委員	石渡 久照	静岡県熱海市 市民生活部理事(環境担当)
委員	佐々木 裕	一般社団法人小浜温泉エネルギー 事務局長

所属は、委員会組織時点のもの

Ⅲ. 研究開発成果について

① 実現可能性調査

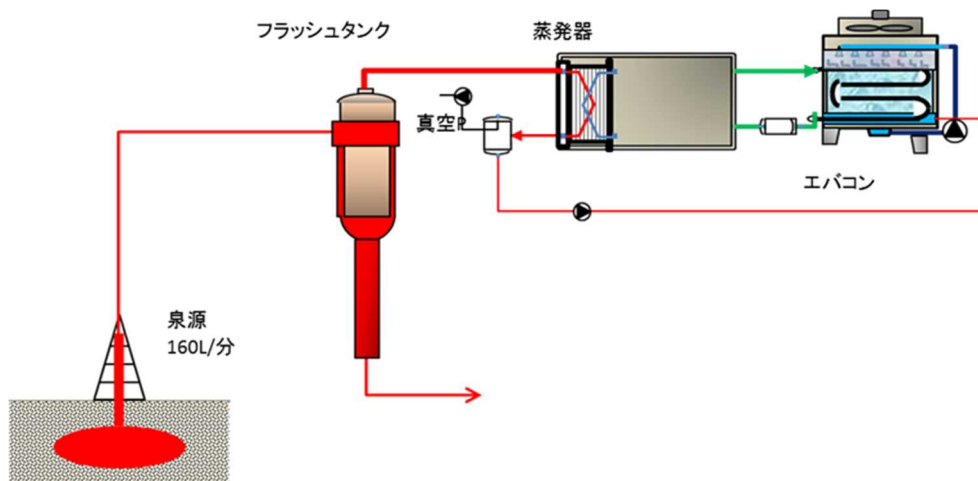
湯量が160L/分以上あり、源泉温度が100℃近い泉源を調査して、九州長崎県にある小浜温泉の休源泉と、熊本県阿蘇郡小国町に建設計画中の地熱発電設備の還元水を熱源とする2箇所のサイトを、小型温泉バイナリー発電の実証試験を行う場所として可能性を調査した。

1-A 小浜温泉休源泉



図Ⅲ(2.3)-1 小浜温泉休源泉

湧出量： 500L/分 自噴
源泉温度： 100℃
設置可能なバイナリー発電機：13.66kW × 3台



図Ⅲ(2.3)-2 実証試験設備

設置場所は十分なスペースがあり、休止中の泉源のため、いつでも実証試験が出来る。

1-B 熊本県小国町地熱発電設備還元水



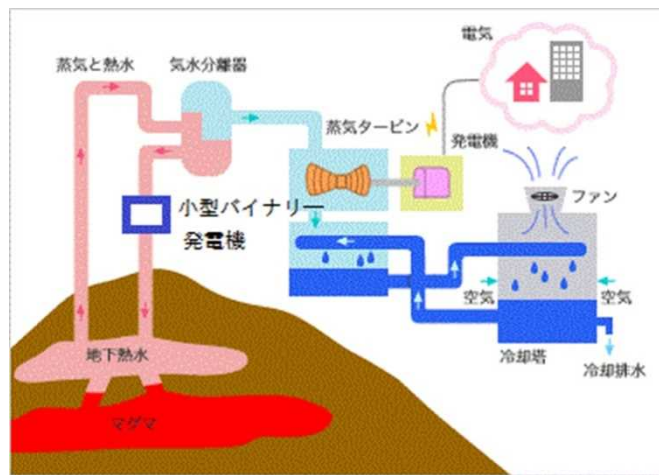
図Ⅲ(2.3)-3 熊本県小国町地熱発電設備

源泉 2 号

湧出量： 800L/分

源泉温度： 200℃

設置可能なバイナリー発電機：13.66kW × 1 台を実証試験として設置可能



図Ⅲ(2.3)-4 熊本県小国町地熱発電設備

地熱発電で発電を行った後の還元水を熱源にすることで、全体の発電効率の向上と経済性の改善に寄与する。

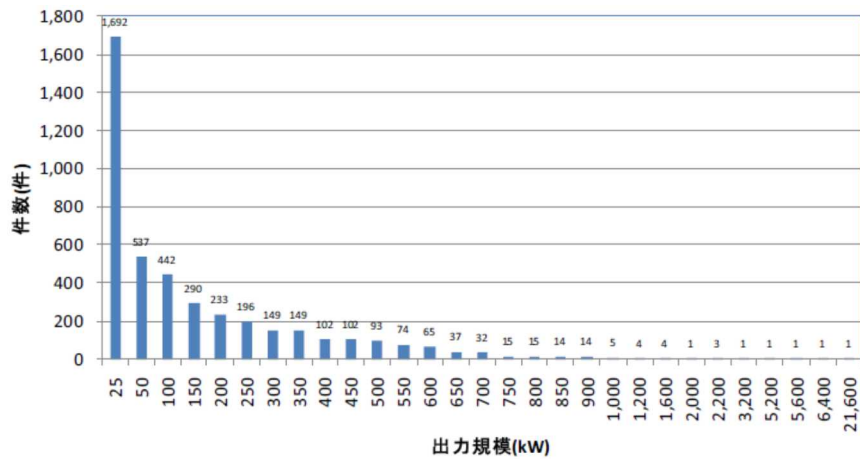
1-C 開発小型バイナリー発電システムの国内市場規模

国内の温泉サイト数等をもとに、バイナリー発電システムの市場性を検討し、開発小型バイナリー発電システムの国内市場規模を想定した。

表Ⅲ(2.3)-1 開発想定バイナリー発電システムの国内市場規模予想

項目	サイト数	提案件数	成約件数	1 台当り単価	市場性(売上額)
温泉熱利用	1000	210	105	7 百万円	735 百万円

160L/分以上の源泉を熱源とする25kW以下のバイナリー発電を設置可能な源泉は全国で1,600以上あるので市場性は十分である事が確認された。

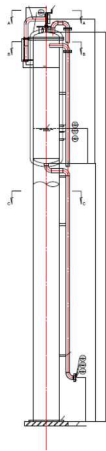


地熱発電研究会資料

図Ⅲ(2.3)-5 出力規模ごとの泉源数

②スケール除去フラッシュタンク開発

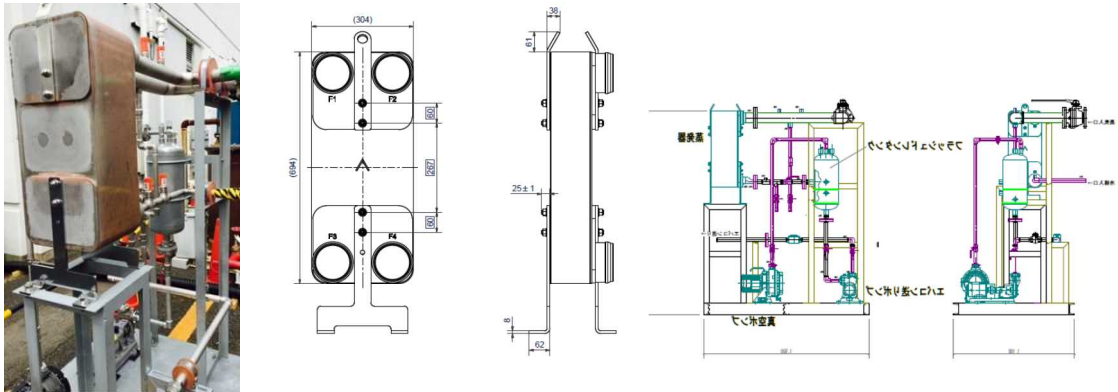
100°Cの源泉から得られる温泉水熱源より85°Cの低圧蒸気を発生するフラッシュタンクを設計し、重力沈降により随伴する液滴の量を最小限にすることで、温泉水に含まれるスケールを発生する成分が熱交換器に移行する事なく、熱源から得られる低圧蒸気を熱交換器に導き、蒸気の凝縮潜熱をバイナリー発電の熱源とするフラッシュ塔を製作した。



図Ⅲ(2.3)-6 フラッシュタンク

③高効率蒸気/冷媒熱交換器開発

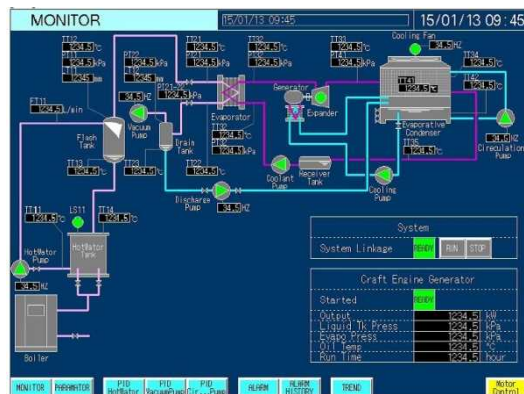
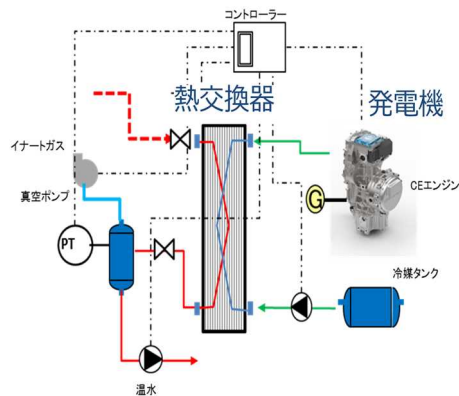
R134a冷媒と蒸気の熱交換器でバイナリー発電の実績が多くある、SWEP社の熱交換器を日本の熱交換器と比較検討した結果選定した。



図Ⅲ(2.3)-7 高効率熱交換器

ドレンタンク・真空ポンプを組み込んで熱交換器ユニットして、市川研究所の試験装置に設置する。

④低圧蒸気制御システム開発



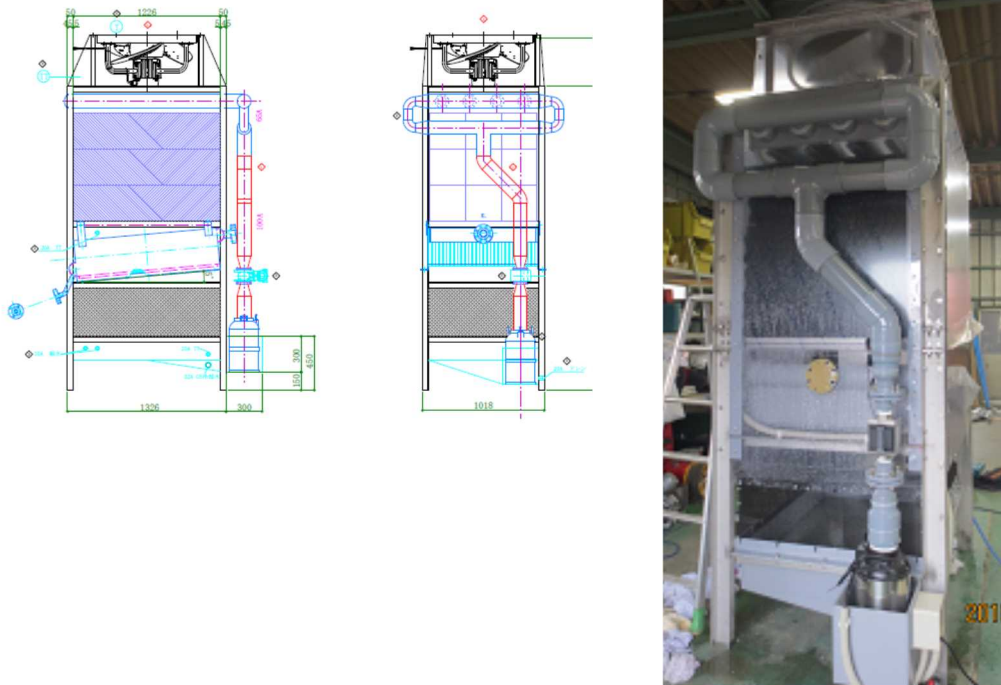
図Ⅲ(2.3)-8 低圧蒸気制御システム

飲料業界で実績のある低圧の曝気システムでの経験を基にして、低圧蒸気のシステム内で不凝縮ガス(温泉の場合CO₂ガスが最も多い)を取り除いて、バイナリー発電の効率を低下させる要因を排除する。

⑤小型蒸発式凝縮器開発

MIRAXのエLEMENTとプレートフィンを使った小型の熱交換器を組み合わせ、高効率な蒸発式凝縮器を設計、製作した。

工場でメカランをして、水の分配、散布状況を確認した。

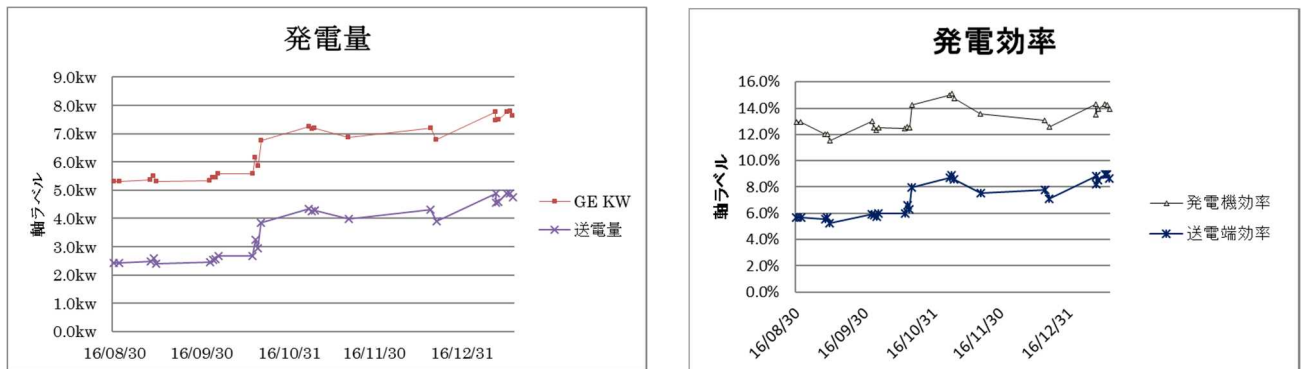


図Ⅲ(2.3)-9 蒸発式凝縮器

⑥発電効率

温泉井戸における総合性能試験として、2016年8月23日から2017年1月18日迄の約5か月の間、熱海来宮湯試験場で温泉を熱源としたバイナリー発電の試運転を行った。

結果、フラッシュ蒸気量を熱源量とした熱量と発電量を比較した発電効率は発電機ユニットでは12~14%の効率であった。発電効率については蒸発式凝縮器が目標として居る性能が得られなかったにも拘らず、夏場で6%以上、冬場で8~9%のシステム発電効率が確認された。エバコンの改良を行い、凝縮温度を下げる事により、通年で7%以上のシステム発電効率を実現する事は可能であると考えられる。



図Ⅲ(2.3)-10 総合性能試験による発電量と発電効率評価

表Ⅲ(2.3)-2 特許、論文、外部発表等

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表		
	国内	外国	PCT※ 出願	査読 付き	その 他	学会発表・ 講演	新聞・雑誌等 への掲載	その他
H25FY	0件	0件	0件	0件	0件	0件	0件	0件
H26FY	0件	0件	0件	0件	0件	0件	0件	0件
H27FY	0件	0件	0件	0件	0件	0件	0件	0件
H28FY	0件	0件	0件	0件	0件	1件	0件	0件

(※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約)

[最終目標に対する成果と達成度]

表Ⅲ(2.3)-3 最終目標に対する成果と達成度

開発項目	開発目標	成果	達成見込み
スケール除去フラッシュタンク	100℃温泉水を低圧58kPa程度で85℃蒸気を抽出し、スケール除去を可能にする。	目標圧力・温度を得ることができた	○ (達成)
高効率蒸気/冷媒熱交換器	蒸気の凝縮温度と冷媒の蒸発温度の差が5℃以下、熱貫流率1.7kW/m ² K以上の維持を可能にする。	左記の温度差は3.02℃であった	○ (達成)
低圧蒸気制御システム	30分以内に58kPa程度に減圧して運転を可能にする。	10分ほどで58kPaの圧力を得られた	○ (達成)
蒸発式凝縮器 (コンパクトエバコン)	冷媒保有量を従来比1/10以下、凝縮温度を冷却水温度+3℃以下とする。 アルミプレートフィンを使用した熱交換器の実績値から3℃を目標値とした。	<ul style="list-style-type: none"> ・冷媒保有水量は従来比1/10以下を達成 ・凝縮温度は冷却水温度+2.5℃だった 	○ (達成)
発電効率： (発電出力値－補機消費電力)／投入熱量	7%以上	発電効率は8.7%を得ることができた	○ (達成)

IV. 実用化に向けての見通し及び取り組みについて

本実績を元に、発電システムを構成する熱交換器、蒸発式凝縮器、バイナリー発電ユニットについて、それぞれの個別メーカーと共同でコスト削減に向けて、量産仕様の機器を製品化するとともに、地元業者・泉源持ち主においてスケール対策メンテナンスを可能とするシステム商品化を進める。バイナリー発電ユニットについては海外製で維持管理体制が難しい為、国内製の代替機を検討中である。湯量の多い自噴泉の泉源を候補として、バイナリー発電システムの商用プラントを数か所選定して有るので、代替のバイナリー発電機ユニットが完成した際には速やかに小型バイナリー発電システムを納入する予定である。発電効率が7%以上の小型バイナリー発電システムは初期投資金額を低く抑えられるので、償却期間も3-5年以内に償却できるので普及をする可能性が大きい。

また、平成30年度以降に、バイナリー発電の可能性のある温泉施設や還元熱水を利用できる地熱発電施設に対して、発電システムの提案、販売活動を進める予定である。

個別テーマ(2.4)

(2)低温域の地熱資源有効活用のための小型バイナリー発電システムの開発

(2.4) 水を作動媒体とする小型バイナリー発電の研究開発

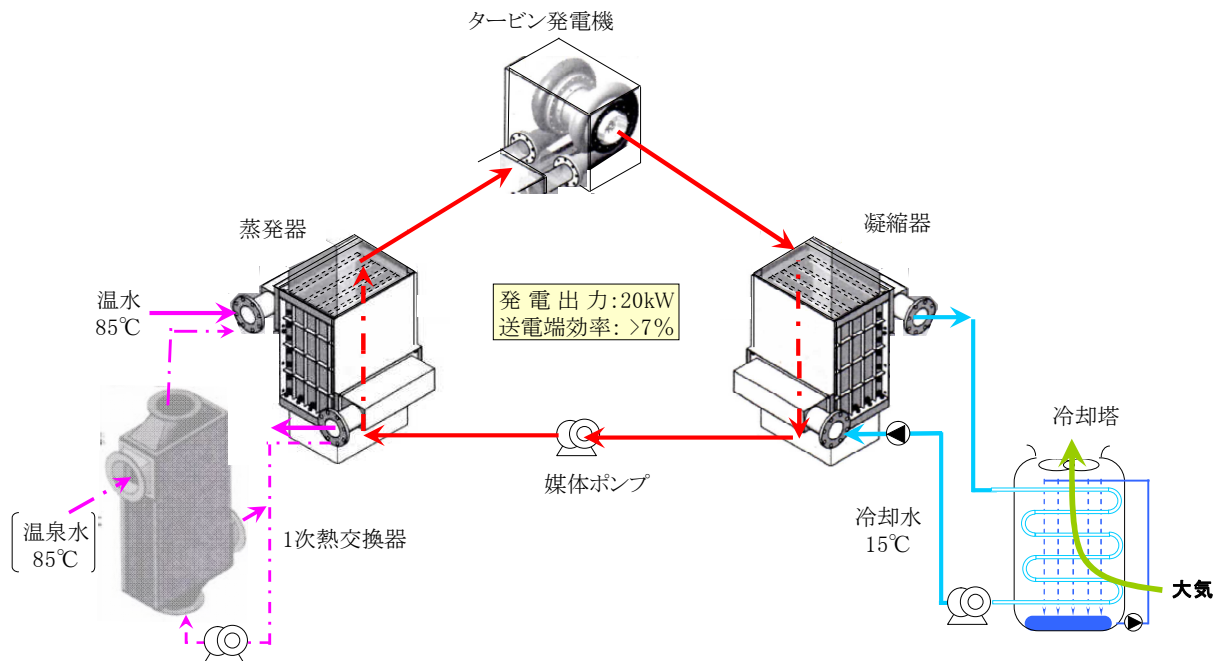
委託先:(一財)エネルギー総合工学研究所
(株)アーカイワークス
(国)東京大学

II. 研究開発マネジメントについて(事業の計画内容)

(2.4.1)背景と目的

近年、比較的温度の低い蒸気や熱水でも、低沸点媒体を熱変換して利用することで発電可能なバイナリー発電の導入が、米国を中心に進みつつある。特に、我が国では、低温地熱エネルギーの中でも温泉熱エネルギーが全国各地に分布し、温泉熱を発電に利用することで地域分散型の電源として活用できることから、バイナリー発電の導入拡大に資する技術開発を行うことを本事業の目的とする。

バイナリー発電が温泉業との共存を図る上で、安全性や環境性の高いシステムであることが重要な条件であり、本事業では、危険性や環境汚染の心配がなく廃棄処理等の対策が不要な水を作動媒体として用いる発電システムを開発する。これにより、バイナリー発電のユーザーや地域社会への受容性を高める。



図II(2.4)-1 バイナリー発電システムの構成機器

(2.4.2)研究開発の概要

① 全体システムの設計・開発(担当:(一財)エネルギー総合工学研究所)

20kW級発電システムおよび温排水を利用した実証試験用システムの基本設計を行う。20kW級発電装置および温排水を利用した実証試験用システム向けに媒体循環ポンプを用いた制御システムを開発する。温排水を用いたフィールドテスト用実証システムのコストおよび採算性について評価する。

また、温泉水を利用した実証試験用システムの基本設計を行い、全体システムの観点から送電端

効率向上のための方策を検討する。温泉水を利用した実証試験用システムのコストおよび採算性を評価する。

② 発電装置の開発(担当:(株)アーカイブワークス)

ツインエンタータービン、水潤滑軸受、可変ノズル機構等の要素技術開発を組み込んだタービン発電機を設計、試作する。システム送電端で発電効率6%以上を達成すべく、各要素技術開発を実施し、それらを組み込んだタービン発電機を開発する。また、内容③の成果を取り込んだ熱交換器を高温度効率化・低圧損化する開発を行い、タービン発電機と組み合わせた20kW級発電装置を製作し、性能試験を行い、温水温度85℃、冷却水温度15℃で送電端発電効率7%以上を実証する。

③ 熱交換器の高性能化の研究(担当:(国)東京大学)

20kW級発電装置において、システム送電端で発電効率6%以上を達成するため、蒸発器、及び凝縮器の流動条件を決定し、これを反映させた数理モデルを構築する。

蒸発器、凝縮器の温水、及び冷水の单相流のシミュレーションを行い、圧力損失、及び伝熱性能を評価する。東京大学で開発された形状最適化アルゴリズムを適用し、流路形状の最適化を行う。また、得られた最適な伝熱面形状に関して、数値シミュレーションの妥当性を検証する。さらに、スケール付着の熱交換器に対する影響をモデル化し、これを考慮した上で、伝熱面形状の最適化を行い、現状の平滑な伝熱面に対して、2.5倍の熱伝達率を実現する。

④ フィールドテスト(担当:エネルギー総合工学研究所、アーカイブワークス、東京大学)

温排水を利用する発電装置をフィールドテストサイトに設置し、発電システムの運転を行い、性能評価を行う。

一方、温泉水を用いた実証試験に向けて、試験機の設置サイトを選定し、温泉水や冷却水の供給条件、発電電力の使用方法を確定する。設置した温泉水を用いる発電装置の運転評価を実施し、温泉水温度 85℃以下で送電端発電効率 7%以上であること、温泉水温度 65℃以下で送電出力可能なことを確認する。実証試験では温度、流量変動への対応、長時間運転時の安定性やメンテナンス性等の評価を行う。

⑤ 研究推進委員会の開催(担当:(一財)エネルギー総合工学研究所)

本事業を計画的かつ効率的に遂行するために、小型バイナリー発電研究推進委員会を設置し、毎年、小型バイナリー発電研究推進委員会を運営する。

表 II (2.4)-1 研究開発目標と根拠

事業項目	研究開発目標	目標レベル設定の根拠
①全体システムの設計・開発	システムの基本仕様の決定、基本設計の実施	温水、冷却水の温度・流量とその日・季節変動を想定し、仕様決定および設計を実施する必要がある。 送電端効率向上のためには、実証試験地の特徴などを考慮し、全体システムの観点から補機類の選定や配置、運用方法を決定することが重要。
	送電端効率向上の方策検討	
	実証システムコスト、採算性の評価	
②発電装置の開発	各要素技術の開発とそれらを組み込んだ発電機的设计・試作	水バイナリー発電装置特有の課題を克服するためには、ツインエンタータービン、水潤滑軸受、可変ノズル機構などの高度な各要素技術の開発、改良、最適化が必要不可欠。 実用化へ向けては量産化、メンテナンス性向上に関する検討が重要。
	各要素技術の改良・最適化と実証試験機への反映	
	新型高効率熱交換器の開発と発電装置への組み込み	
	量産化に適し、メンテナンス性に優れた発電装置の製作	
③熱交換器の高性能化の研究	数理モデルの構築とシミュレーションコードの開発	高効率伝熱面形状を設計するためのツールとしてシミュレーションコードが必要。実際の製作には加工の制約などがあるため、それらを考慮し試作を実施し検証する。
	高効率伝熱面形状の提案、試作および検証	
	現状の平滑な伝熱面に対して2.5倍の熱伝達率を実現	
④フィールドテスト	実証サイトの選定、温泉水・冷却水の供給条件などの調査	送電端効率7%を目標とした実証を行うために、要件を満たす実証サイトの選定、サイトの実態に即したシステム構成を策定する必要がある。温泉水、冷却水の温度条件は開発機器の性能などを考慮し、目標送電端効率の達成が見込まれる値とした。長時間運転による評価は実用化へ向けて重要。
	システム構成、工事計画の策定、設置工事実施	
	温泉水温度 85℃以下、冷却水温度 15℃で送電端効率7%以上	
	温泉水 65℃で送電出力	
	長時間運転試験の安定性、耐久性、メンテナンス性、スケールの影響の評価	

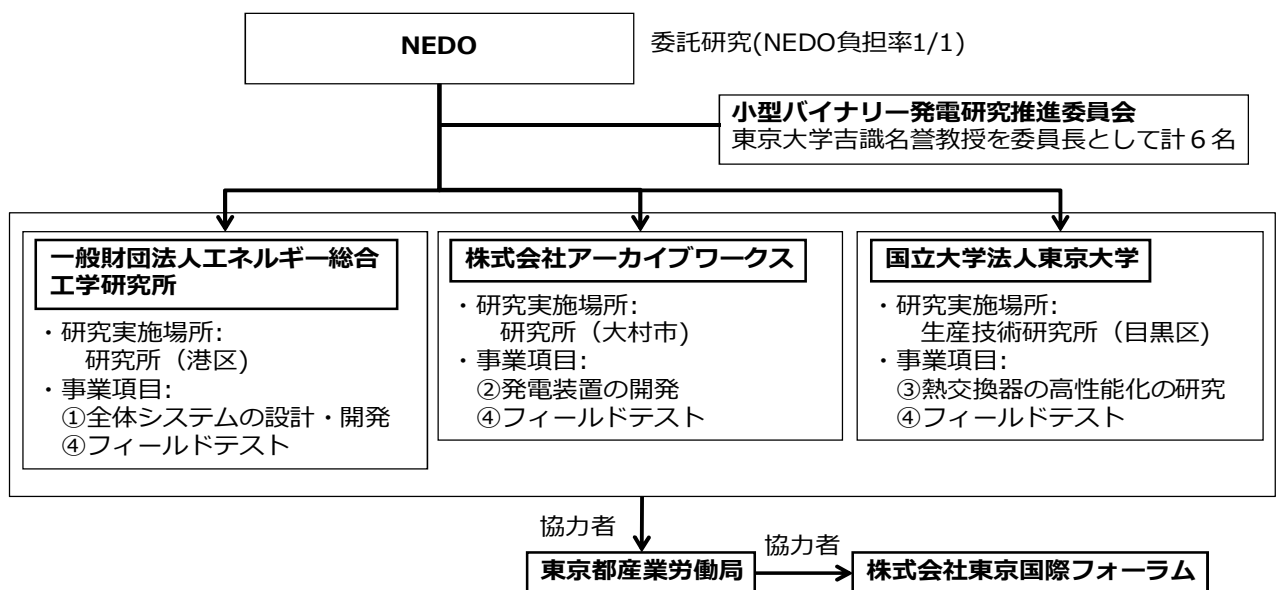
(2.4.3)事業スケジュール

本事業の研究期間は、平成24年12月25日から平成30年3月20日までである、主な事業スケジュールの概要を平成28年度以降の参考スケジュールと共に図Ⅱ(2.4)-1に示す。平成24年度内に発電システムの設計を行い、平成27年度上期に温排水を利用した発電システムの製作、下期に運転を予定している。また、平成28年度下期までに温泉水を利用した発電システムを製作し、平成29年度に温泉地での実証試験を行う。

事業項目	26年度				27年度				28年度				29年度				
	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q	
①全体システムの設計・開発		システム設計			制御システム開発				効率向上検討								
					コスト・採算性評価								コスト・採算性評価				
②発電装置の開発		流動解析・試作						設計／製作／改良									
										運転							
③熱交換器の高性能化の研究		コード開発			単相流側最適化						相変化側最適化						
④フィールドテスト（温排水システム）				設計／製作／設置						運転評価							
④フィールドテスト（温泉水システム）							設計／製作／設置						運転評価				
⑤委員会設置・運営				△	△	△	△	△	△	△	△	△				△	

図Ⅱ(2.4)-1 事業スケジュール

(2.4.4)研究開発の実施体制



(2.4.5)研究開発の運営管理

表Ⅱ(2.5) - 表Ⅱ2.4-2.4 水を作動媒体とする小型バイナリー発電の研究開発 技術検討委員会
一般財団法人エネルギー総合工学研究所
株式会社アーカイブワークス
国立大学法人東京大学

担当	氏名 (敬称略)	所属
委員長(事務局案)	吉識 晴夫	(公社)建設荷役車両安全技術協会 会長(東京大学名誉教授)
委員	荒川 忠一	東京大学大学院工学系研究科 教授
委員	刑部 真弘	東京大学大学院工学系研究科 教授
委員	金子 成彦	東京大学大学院工学系研究科 教授
委員	長崎 孝夫	東京工業大学大学院総合理工学研究科 准教授
委員	古谷 博秀	国立研究開発法人産業技術総合研究所 福島再生可能エネルギー研究センター 副研究センター長
委員※	松山 一夫	(株)地熱総合研究所 代表取締役

所属は、委員会組織時点のもの

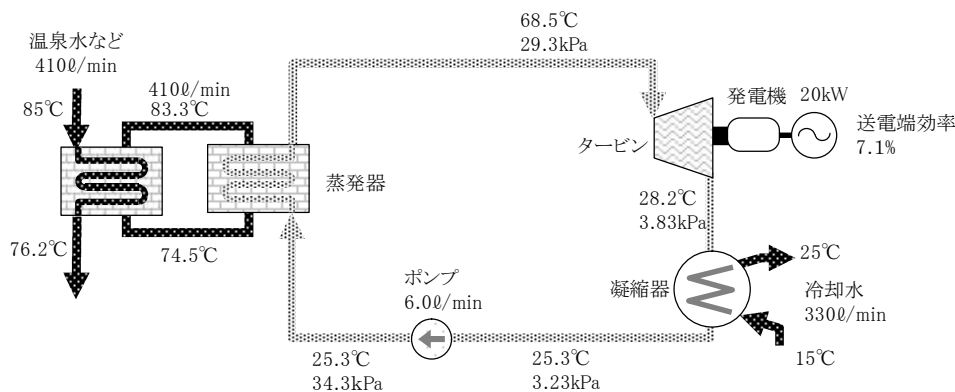
※平成 28 年 2 月より

Ⅲ. 研究開発成果について

バイナリー発電は、従来技術では代替フロンやアンモニア、ペンタンなどの低沸点流体を作動媒体として用いるが、温室効果ガスであることや、可燃性、毒性を有する等の問題がある。本研究開発では、作動媒体も軸受潤滑剤も水を使用することで、環境負荷ゼロの新規の発電システムを実現し、実証試験を実施した。各実施内容と達成状況を以下に記す。

①全体システムの設計・開発

温水（温排水、温泉水を含む）および冷却水の温度、流量とそれらの日変動、季節変動を考慮したシミュレーションを実施し、それに基づいて基本仕様の決定および基本設計を実施した。また、実証試験地における様々な温泉水、冷却水の供給方法を検討し、適切な供給方法および機器を選定した。機器配置の最適化や、インバータなどの省エネ対策により送電端効率向上の方策を検討し、実際の実証試験設備に反映させた。実証試験により取得された実測データをもとにコスト、採算性の試算および評価を行った。



図Ⅲ(2.4)-2.一次熱交換器を備えた場合の20kW級発電システム

コスト、採算性については、20kWでの発電の想定収支から設備の限界取得価額を算出した。

【想定収入】発電出力20kW、年間発電利用率75%、売電単価40円/kWhの条件のもと、20kW発電時におけるユーティリティ消費量の所内動力から、所内率を得、発電事業の年間収入を算出。

【想定支出】電力料、水道使用料、修繕料、委託料（電気主任技術者）、賃借料（土地使用料、河川占有料）、資本費（減価償却費+支払利息）、償却資産税、諸経費より年間支出を算出。

これらの収支から設備の限界取得価額を算出した。温泉水や冷却水といったユーティリティが自流によって得られ、これにかかる動力やコストを不要とすることができたケースでは、設備の限界取得価額が32,812,000万円となり、発電事業の実現性はより高まることになる。既設のインフラの中に組み込めるような好立地条件が望ましく、例えば工場排熱の利活用のような用途も考えられる。そうなれば、電気主任技術者代行等の委託費も不要となる可能性があり、収支は更に好転する。

②発電装置の開発

ツインエントリータービン、水潤滑軸受、可変ノズル機構等について解析を行い、これらを組み込んだ10kW級および20kW級タービン発電装置を設計・製作した。東京国際フォーラムおよびつなぎ温泉に発電装置を設置し運転試験を実施した。また、運転試験により得られた知見をもとに、各要素技術の改良と最適化を実施し、それらを発電装置に反映させた。さらに、量産化、メンテナンス性を考慮して随時改良を加え、発電装置の完成度を高めた。

・ツインエントリータービン

水バイナリー発電は、85°Cで蒸発した72°C、0.034kPa蒸気でタービンを駆動し、28°C、0.003783kPaで凝縮させるために、大気圧以下の低圧で作動するので、蒸気の容積が大きく、

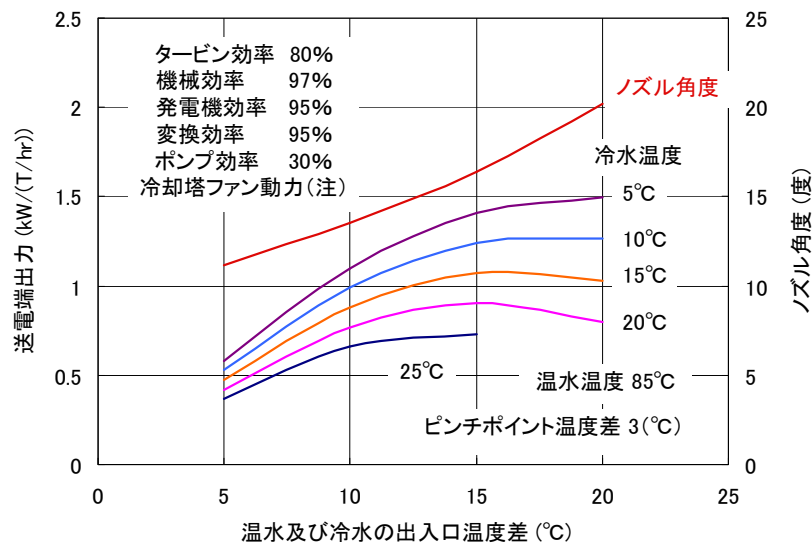
タービンのサイズも大きくなり、設置場所が広く必要で、コストも高くなる。この欠点を、少しでも少なくするために、ツインエントリータービンを採用し、タービン外径を1.4分の1に小さくした。さらに、発電機ロータの両端にタービン動翼を取付け、コンパクト化を図った。

また、速い蒸気速度に適応するように高回転動翼を採用、高効率化を図った。この高回転数のロータと動翼が安全に回るために、軸系の振動解析、動翼の強度解析、5軸NC加工による動翼の製作を行った。

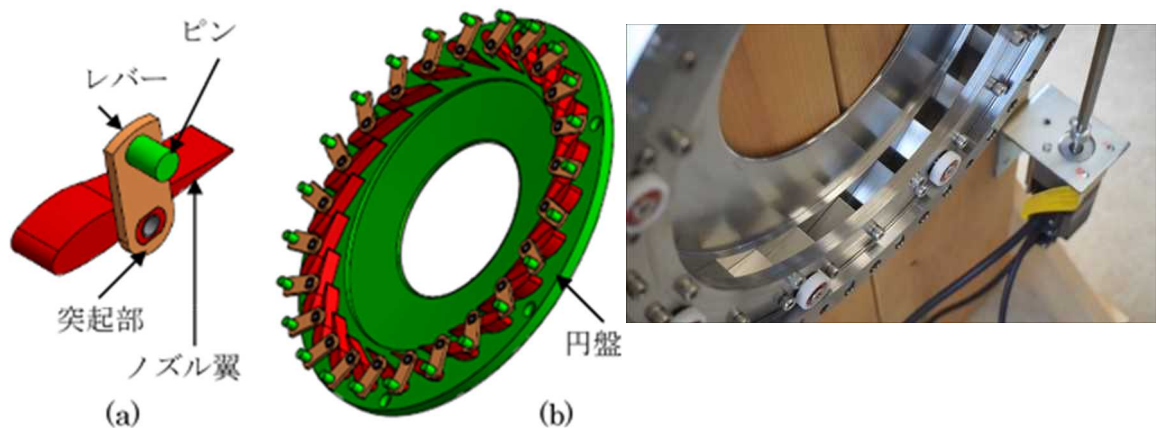
・可変ノズル

出力を出すための温水及び冷水流量の変化に対応するためには、固定ノズルでは対応できないので、可変ノズル構造が必要であり、動翼出口でもチョークしないことが必要である。このため、動翼出口については環状面積を大きくとる設計とした。

下図に、ノズル角度を変化させたときの温水出入口温度差に対する送電端出力の変化を示す。温泉の限られた温水流量から得られる送電端出力は、温水の温度差を大きくとる方が大きくなるので、経済性は良くなる。



図Ⅲ(2.4)-3. ノズル角度を変化させたときの温水出入口温度差に対する送電端出力の変化



図Ⅲ(2.4)-4.可変ノズル(VG) の開発

・水潤滑軸受

水バイナリーサイクル発電装置は、密閉した装置の中で水を蒸発させてタービンを駆動して発

電する装置であり、水の中に別の物質が入るとサイクルが維持できなくなるため、水以外のものを使うことができない。そのため、必須の要素である水潤滑軸受を開発した。

水潤滑軸受は、粘性の低い水を潤滑剤として使用するために、軸受面積を広くとり、隙間を小さくする必要がある。そのために、軸の外径が大きく、周速が高くなる。このジャーナル軸受に接する軸の径は45mm、回転数36000rpmであり、DN値162、軸受周速84.8m/sと高い値である。このために、キャビテーションの発生を抑え、軸受損失の低減を図ることが必要となる。

軸受材料としては、樹脂材が使われるが、樹脂は熱変形が大きく、熱がかかると膨潤して接触の原因となる。このため、ステンレスにコーティングしたもの、樹脂材、樹脂材とステンレスを組み合わせたもの等の種々の材料を使用し、最適化を行った。

- ・発電装置の組み立て、製作



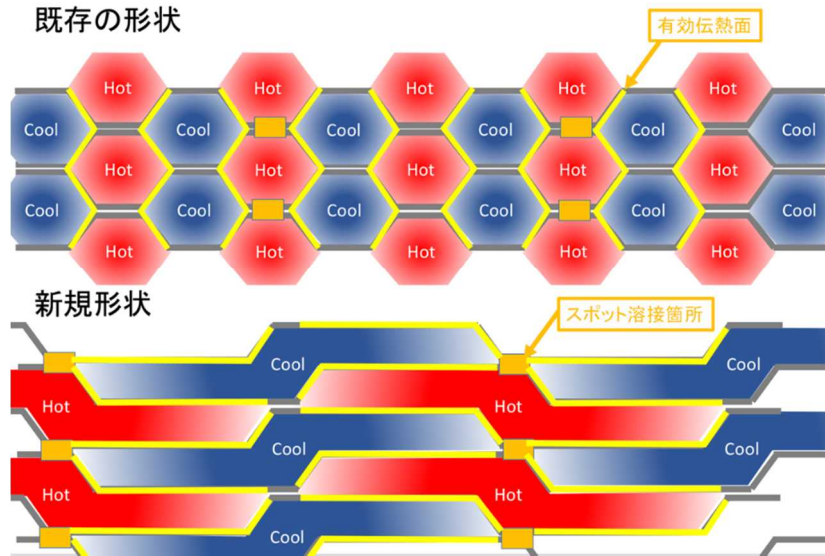
図Ⅲ(2.4)-5.国際フォーラム発電装置の製作



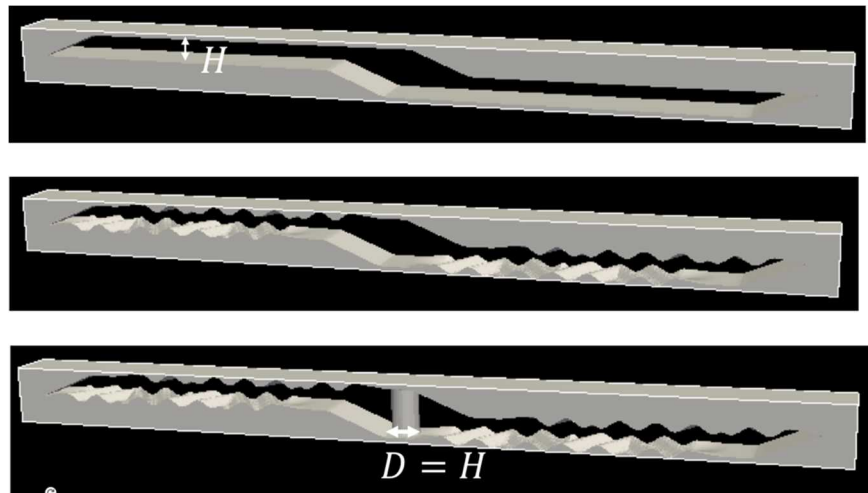
図Ⅲ(2.4)-6.つなぎ温泉発電装置の製作

③熱交換器の高性能化の研究

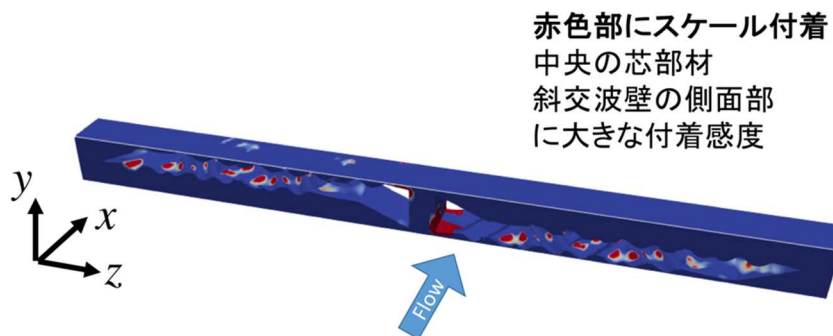
伝熱促進と圧力損失の低減という、相反する要求を満たす高性能な熱交換器を設計開発するため、設計のツールとなる数理モデルの構築とシミュレーションコードの開発を実施した。本ツールを用いたシミュレーションと流路形状最適化の検討を行い、伝熱面形状の試作と、流れ場計測による検証を実施した。その結果、通常の平滑な伝熱面に比較して熱伝達率が5倍程度向上する伝熱面を提案した。



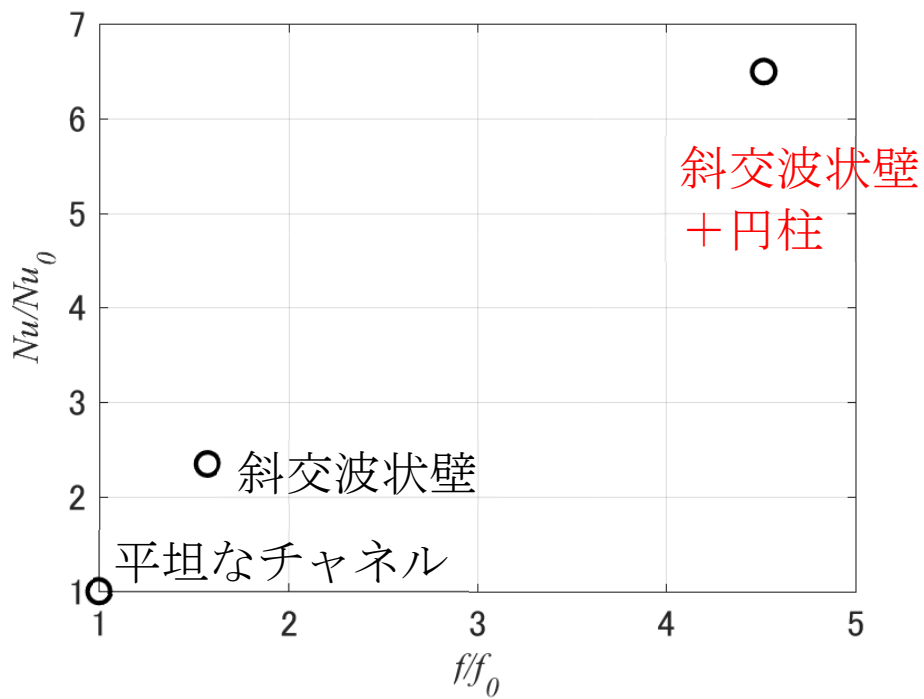
図Ⅲ(2.4)-7.既存のプレート形状(上図)と本研究で新規に提案した形状(下図)の比較
(赤：熱源の温泉水の流路、青：システム作動媒体(水)の流路)



図Ⅲ(2.4)-8.平滑面(上段)、斜交波状面(中段)、斜交波状面+障害物の挿入(下段)



図Ⅲ(2.4)-9.熱と物質輸送の相似性から推定されるスケールの付着箇所



図Ⅲ(2.4)-10. 新型熱交換器の熱交換結果



図Ⅲ(2.4)-11. 本研究で開発したプレート型熱交換器

④ フィールドテスト

温排水を利用する実証試験地として東京国際フォーラムを選定した。既存配管における温水、冷却水の温度および流量とその変動状況を調査した上で、それに基づいて発電装置への温水、冷却水の供給システムの構成を決定し、タービン発電システムを設置した。運転試験を行った結

果、85℃の温排水で出力約6 kWの発電実績が得られ、運転データを取得した。



図Ⅲ(2.4)-12.TIF実証試験装置外観写真

日本の各温泉地の調査を行い、実証試験地として岩手県盛岡市のつなぎ温泉を選定した。現地の温泉水・冷却水の供給条件などについて詳細に調査した上で、適切な発電設備の構成を検討し、実証試験設備を設置した。運転試験を実施した結果、85℃の温泉水で出力3～6 kW、(回転数は設計通り500～600 Hz)の運転実績が得られ、さらに65℃の温水でも発電可能であることを実証した。一方で、目標出力である20 kWは達成できず、夏期・冬期を含む年間の長期運転は実施できなかった。そのため、長時間運転時の機器の耐久性、安定性、メンテナンス性の検証評価、およびその知見を含めた採算性の評価については課題が残る結果となった。



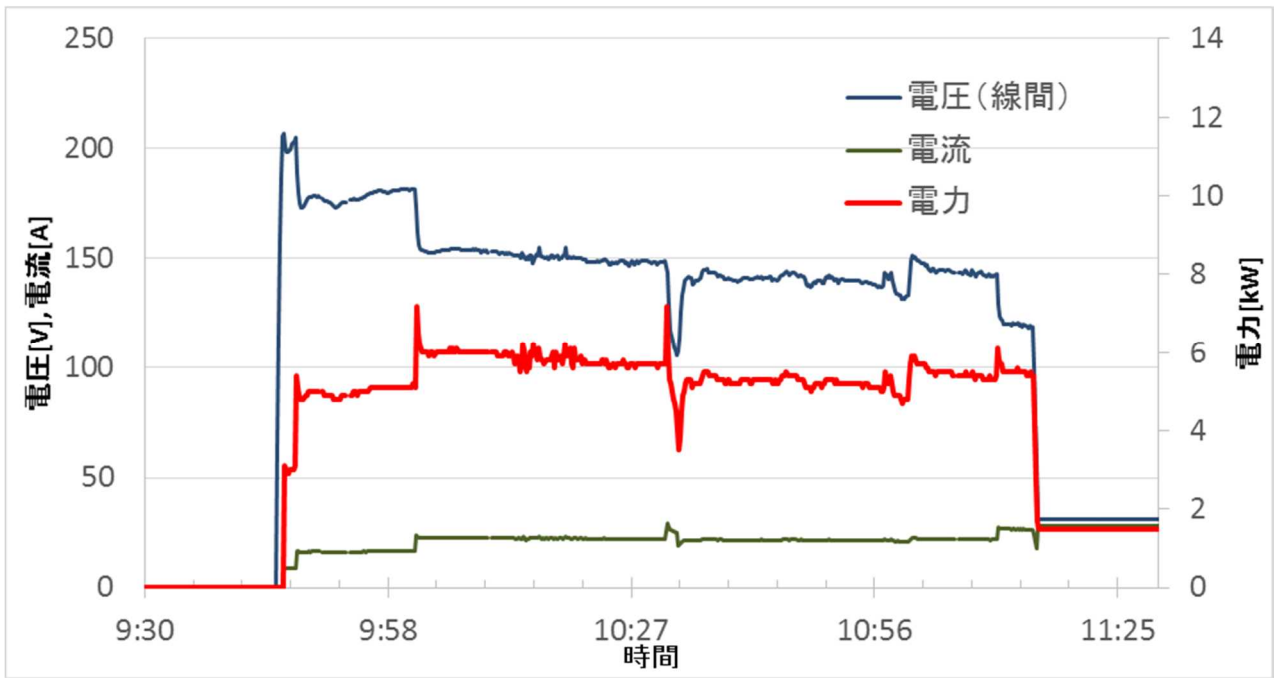
図Ⅲ(2.4)-13.実証試験設備全体



図Ⅲ(2.4)-14.タービン (開放時)



図Ⅲ(2.4)-15.系統連系装置



Ⅲ(2.4)-16 つなぎ温泉での運転試験における出力電力、電圧、電流測定結果例

表Ⅲ(2.4)-1 特許、論文、外部発表等

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表		
	国内	外国	PCT※ 出願	査読 付き	その 他	学会発表・ 講演	新聞・雑誌等 への掲載	その他
H2.4FY	0件	0件	0件	0件	0件	0件	0件	0件
H27FY	0件	0件	0件	0件	0件	0件	0件	0件
H28FY	0件	0件	0件	0件	0件	2件	3件	0件
H29FY	0件	0件	0件	0件	0件	3件	2件	0件

(※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約)

[最終目標に対する成果と達成度]

表Ⅲ(2.4)-2 最終目標に対する成果と達成度

事業項目	最終目標 (平成 29 年度末)	成果	達成度 (目標達成のために解決すべき課題)
①全体システムの設計最終目標に対する成果と達成度・開発	システムの基本仕様の決定、基本設計の実施	温水、冷却水の温度・流量と日・季節変動を考慮したシミュレーションにより、基本仕様を決定した。温排水、温泉水実証設備の基本設計を実施した。	○
	送電端効率向上の方策検討	様々な温泉水、冷却水供給方法を検討し、適切な供給方法および機器を選定した。機器配置の最適化や省エネ対策（インバータなど）により、送電端効率向上の方策を検討した。	
	実証システムコスト、採算性の評価	目標とする出力（20kW）での運転試験と長期試験が未実施のため、実測データによる評価は出来なかったが、現状で取得済みの実測データと、今後得られる運転データの予測値をもとにコスト試算、採算性を評価した。	
②発電装置の開発	各要素技術の開発とそれらを組み込んだ発電機的设计・試作	ツインエントリータービン、水潤滑軸受、可変ノズル機構などの各要素技術の解析・開発を行い、それらを組み込んだ発電機的设计・試作を行った。	△ (開発遅延リスクを踏まえた適切な工程管理。)
	各要素技術の改良・最適化と実証試験機への反映	試運転により得られた知見をもとに各要素技術の改良と最適化を実施し、それを反映した発電装置を製作した。	
	新型高効率熱交換器の開発と発電装置への組み込み、発電装置性能試験	新型高効率熱交換器の試作を完了した。発電機に組み込んだ試験は、他の課題対応に追われ未実施。	

	量産化に適し、メンテナンス性に優れた発電装置の製作	量産化、メンテナンス性を考慮し、随時改良を加え、実証試験に反映させた。	
③熱交換器の高性能化の研究	数理モデルの構築とシミュレーションコードの開発	数理モデルを構築し、シミュレーションコードを開発した。	○
	高効率伝熱面形状の提案、試作および検証	シミュレーションと流路形状最適化を実施した。伝熱面形状の試作と、流れ場計測による検証を実施した。プレスの制約条件を考慮した伝熱面を提案し、試作した。発電機に組み込んだ試験は未実施。	
	現状の平滑な伝熱面に対して 2.5 倍の熱伝達率を実現	平滑な伝熱面に対して熱伝達率が 5~6 倍程度向上する伝熱面を提案した。	
④フィールドテスト	実証サイトの選定、温泉水・冷却水の供給条件などの調査	各温泉地の条件調査、視察を行い、TIF（温排水）、つなぎ温泉（温泉水）を実証サイトとして選定し、温泉水・冷却水の供給条件を詳細に調査した。	△ 想定出力での長期運転が出来ず。原因抽出と対策が課題。
	システム構成、工事計画の策定、設置工事实施	上記調査をもとに適切なシステム構成、工事計画を策定し設置工事を実施した。	
	温泉水温度 85℃以下、冷却水温度 15℃で送電端効率 7%以上	3~6kW 程度の出力で数時間安定運転可能な実績を得たが、目標出力の 20kW には至らなかった。	
	温泉水 65℃で送電出力	蒸発器へ入る温水の温度が 65℃となるよう条件を設定して試験し、0.9kW 程度の出力を得た。	
	長時間運転試験の安定性、耐久性、メンテナンス性、スケールの影響の評価	長時間運転ができなかったため、評価不能であった。ただし、これまでの不具合による修理作業、改良などから、耐久性やメンテナンス性に関して一定の知見は得られた。	

IV. 実用化に向けての見通し及び取り組みについて

今後、実用化に向けては、ハード面と運用面で以下の課題があり、それらを解決することで実用化への道筋がみえると考える。

【ハード面】

- 発電装置製造コスト
 - ・製造コストは、実証試験装置で100万円/kWの見通しを得て、製造台数100台/年では、50万円/kW、1000台/年では25万円/kWの見通しを得た
- 発電装置真空箇所（媒体系統）の気密性（真空度保持）
 - ・週程度の気密性の確保はできたが、数月単位の連続運転による実証が残された
- 長期安定運転（出力・稼働率向上）
 - ・目標出力20kW一定でベース電源運用ができるよう、出力・稼働率の向上が必要
- 安全対策
 - ・VGノズル閉止および負荷抵抗器によるタービン過回転防止が可能となったが、精度と信頼性向上が必要

【運用面】

- 運用コスト低減
 - ・冷却水補給量の低減など、保守・保安にかかるコストの圧縮が望ましい
- 運転制御操作の簡素化
 - ・温泉地への導入拡大のため、遠隔制御システムを開発、マニュアルの整備や一部自動化を行い、専門性を有しない者でも遠隔地からの運転制御が可能となった。
- 規制緩和
 - ・小出力太陽光等と同じ一般用電気工作物となれば、運用コストの低減にも繋がる

また、継続試験により下記の課題について引き続き検討を行う。

- 発電系統の長期気密性維持の改良と実証
 - ・環境変化によるミリ単位変形を吸収するフレキ配管の採用
 - ・運転中の真空度変化特性の確認と真空度向上策の探索
- 長期安定運転の実現
 - ・目標出力20kWでの運転が可能な全体システムの構築
 - ・運転可能時間の長時間化を目指した取り組み
- 運転制御操作の簡素化
 - ・実証試験で得られた各種運転パラメータおよび起動/停止などの運転手順やトラブル対応に基づき、運用者向けの簡易マニュアル整備が必要

個別テーマ(2.5)

(2)低温域の地熱資源有効活用のための小型バイナリー発電システムの開発

※(4)「地熱発電の導入拡大に資する革新的技術開発」テーマ

(2.5) 事業採算性と環境保全を考慮したバイナリー発電システムに供するタービン発電機の開発設計

委託先:丸和電機株式会社

II. 研究開発マネジメントについて(事業の計画内容)

(2.5.1)背景と目的

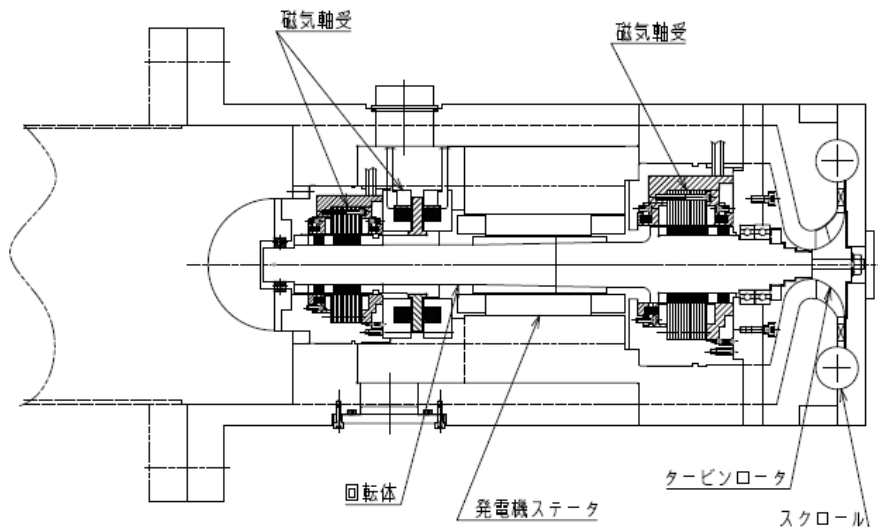
我が国には、全国各地に温泉熱エネルギーが分布し、温泉熱を発電に利用する地域分散型のバイナリー発電の導入拡大が期待されているものの、実用化に至っている件数が乏しく、早急に高効率な地熱発電開発を実現する必要に迫られている。

当事業では、我が国の地熱発電事業の導入拡大を図るべく、国産化技術として高効率化システムを目指し、さらに環境に配慮した無潤滑でメンテナンスフリー、オゾン層破壊係数ゼロで、地球温暖化係数の小さい低沸点の新媒体を採用した採算性に優れたタービン発電機の開発設計を行う事を目的とする。

(2.5.2)研究開発の概要

本開発研究では、地熱エネルギー源の対象を 65°C 以上、 95°C 以下程度の熱水、 15°C 以上の冷却水を条件として、地球温暖化係数の小さいハイドロフルオロオレフィンを作動媒体にするバイナリー発電用タービン発電機を詳細設計する。さらに環境に配慮した無潤滑で、定期的なメンテナンスが不要な磁気軸受を設計し使用する。また、バイナリー発電および地熱発電までの対応を想定し、 $50\text{ kW}\sim 250\text{ kW}$ の発電出力を実現可能なタービン発電機の仕様を確定する。

設計するタービン発電機のイメージを図II(2.5)-1に示し、研究開発目標と根拠を表II(2.5)-1に示す。



図II(2.5)-1 タービン発電機のイメージ図

表Ⅱ(2.5)-1 研究開発目標と根拠

開発項目	開発目標	設定根拠
(1) タービン発電機の検討	環境保全型作動媒体を用いた高効率タービン発電機の構築	地熱発電所の環境を保全した発電システムの達成
(2) 断熱効率達成の可能性検討	高断熱効率の遠心式タービンの構築 <タービン断熱効率 86%以上>	熱効率 7%以上のシステムの達成
(3) 発電機本体の設計	各種モータ冷却（水冷または媒体冷却）方式のタービン発電機の構築	タービン発電機の機能達成の可能性の確定と低コスト化の達成
(4) 磁気軸受搭載回転体設計	高耐久性高速回転体の最適構造の構築 <ベンディングマージン 30%以上>	長寿命・メンテナンスフリータービン発電機の構造の確定
(5) タービンの設計	最大断熱効率を得るタービン形状の構築 <システム熱効率 7%以上>	年間最大発電量と熱効率 7%以上のシステムの達成
(6) タービン発電機詳細設計	上記目標を達成するタービン発電機の構築	高機能、低コストのタービン発電機の製造・供給の達成
(7) 実用化・事業化検証	タービン発電機のコストの算定	エンジニアリング企業、製造企業へのタービン発電機の商流の達成

(2.5.3)事業スケジュール

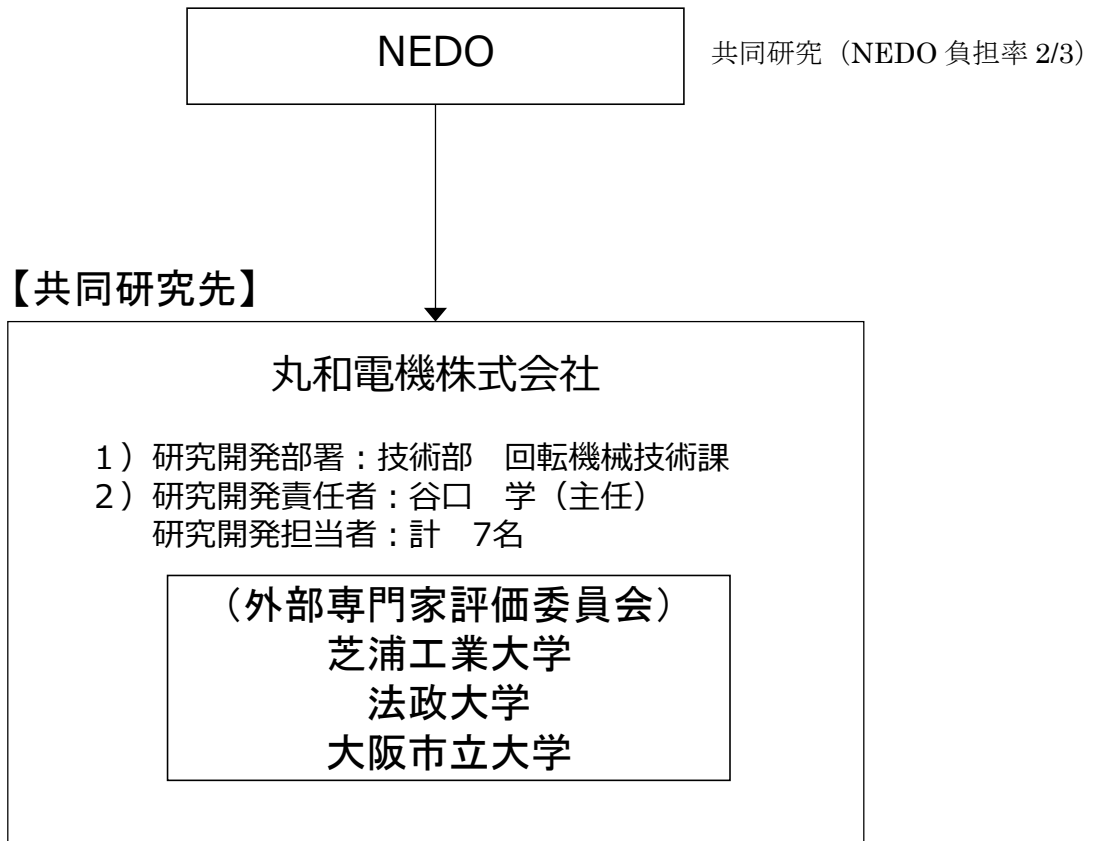
本事業の研究期間は、平成28年1月6日より平成30年 2月までで、主な事業スケジュールの概要を図Ⅱ(2.5)-2に示す。外部専門家による評価委員会を3回実施した

事業項目	27年度	28年度				29年度			
	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q
①タービン発電機の検討	←→								
②断熱効率達成の可能性検討		↔							
③発電機本体の設計		↔							
④磁気軸受搭載回転体設計			←→						
⑤タービンの設計	←→								
⑥タービン発電機詳細設計				←→					
⑦実用化・事業化検証								←→	→

図Ⅱ(2.5)-2 研究開発のスケジュール

(2.5.4)研究開発の実施体制

本事業の研究開発体制を図Ⅱ(2.5)-3に示す。共同研究先は、丸和電機株式会社となり、内部各研究員と外部専門家評価委員会より構成する。



図Ⅱ(2.5)-3 研究開発の実施体制

(2.5.5)研究開発の運営管理

表Ⅱ(2.5)-2に外部専門家評価委員会の各委員を示す。各委員は、発電機・制御機器、タービン翼およびノズル設計、軸受設計・回転機械設計の専門家で構成する。

表Ⅱ(2.5)-2 事業採算性と環境保全を考慮したバイナリー発電システムに供するタービン発電機の開発設計
外部専門家評価委員会

担当	氏名 (敬称略)	所属
委員長(事務局案)	高見 弘	芝浦工業大学 電気工学科 教授
委員	辻田 星歩	法政大学 機械工学科 教授
委員	六角 和夫	大阪市立大学 複合先端研究機構 人工光合成研究センター特別研究員

丸和電機株式会社

所属は、委員会組織時点のもの

Ⅲ. 研究開発成果について

地熱エネルギー源の対象を65℃以上、95℃以下程度の熱水、15℃以上の冷却水を条件として、地球温暖化係数の小さいハイドロフルオロオレフィンを作動媒体にするバイナリー発電用タービン発電機的设计に関し下記結論を得た。

①タービン発電機の検討／②タービン断熱効率達成の可能性

95℃の熱水を熱源とし15℃以上の冷却水を冷却条件とし、地球温暖化係数GWP = 1 で不燃性のハイドロフルオロオレフィン、HFO 12.5 3zd (E) を作動媒体とした280kWのバイナリー発電用遠心式タービンは翼の直径=0.320m、回転数=8,150rpmで設計検討し、結果タービンの断熱効率は目標値の86%を達成できる可能性を得た。

タービン断熱効率解析

Ns-Ds解析法(右図による)

$$Ns = 2\pi NV^{0.5}/(gHad)^{0.75}$$

$$Ds = D(gHad)^{0.25}/V^{0.5}$$

- ・Ns = 無次元比速度
- ・Ds = 無次元比直径
- ・N : 回転数 (rps)
- ・V : 入口体積流量 (m³/s)
- ・gHad : 断熱ヘッド (J/kg)
- ・D = タービン翼直径 (m)

回転数と直径の設定

タービン断熱効率 $\eta_t = 0.86$

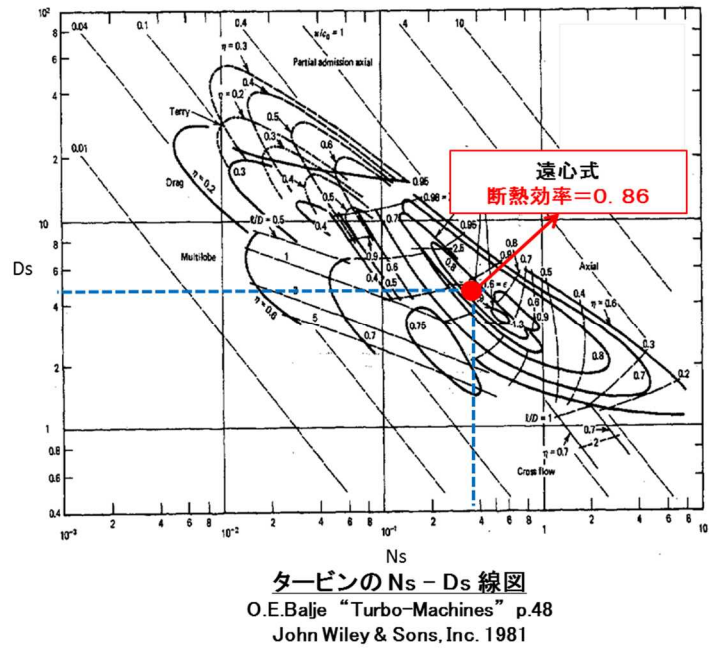
Ns = 0.38 Ds = 5.0

↓

(中間期条件)

↓

回転数 N = **8,150 rpm**
 翼直径 D = **0.320m**
 翼周速 = **136.5 m/s**
 速度比 = 翼周速/断熱膨張速度
 = **0.67**



図Ⅲ(2.5)-1. タービンの Ns-Ds 線図

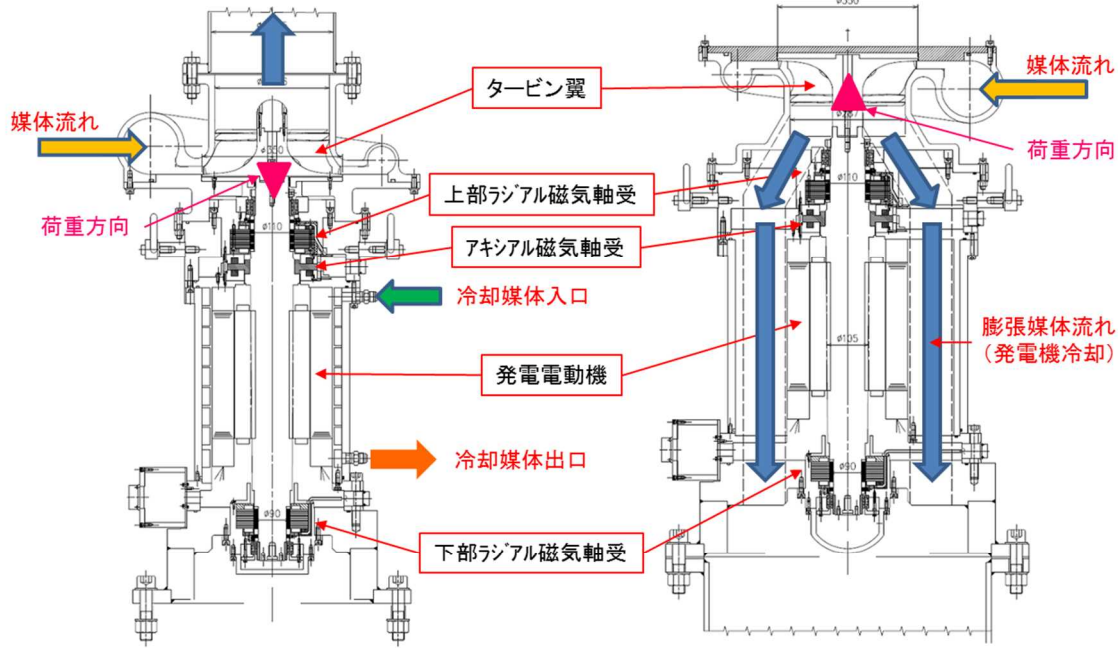
③発電機本体の設計／④磁気軸受搭載回転体設計

タービン発電機全体構造として、環境に配慮した無潤滑で、定期的なメンテナンスが不要な磁気軸受を採用し、発電機の冷却を液体媒体冷却方式と膨張媒体冷却方式を候補とし、回転体をモデル化、ロータダイナミクス解析を実施し、1次曲げ固有振動数のベンディングマージンを前者候補で3.9倍(390%)、後者候補で2.8倍(280%)を得た。(安定制御可能)

図Ⅲ(2.5)-2に発電機の冷却方式についてのタービン発電機全体構造候補を示す。また、同構造における回転体のロータダイナミクス解析結果を示し、いずれの構造においても、使用回転数内において、十分安全な固有振動数特性である事が判断出来る。

I. 媒体(冷媒液体)冷却または水冷方式

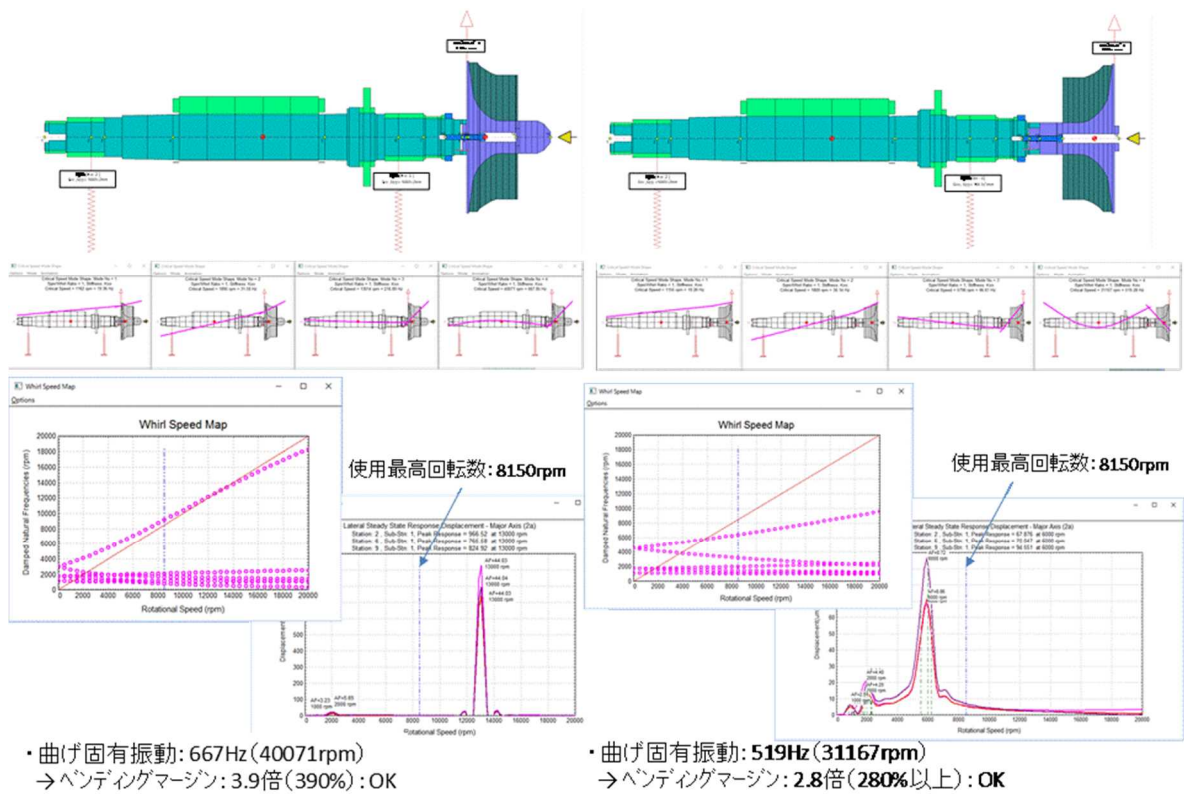
II. 膨張媒体(冷媒)冷却方式



長所	<ul style="list-style-type: none"> ・構造が簡単(単段ブロウ構造に類似) ・外径寸法が小さい(水冷構造) ・重量が軽い
短所	<ul style="list-style-type: none"> ・磁気軸受負荷荷重が大きい(インペラ発生荷重方向が重力方向) ・液体媒体が多く必要(凝縮器の負荷が大きい)

長所	<ul style="list-style-type: none"> ・磁気軸受負荷荷重が低減(インペラ発生荷重方向が反重力方向) ・膨張した媒体で直接冷却出来る
短所	<ul style="list-style-type: none"> ・構造が複雑(インペラ逆取付方式) ・外径寸法が大きい(内部冷却フィン構造) ・重量が重い ・フィン構造によりコスト高の可能性あり

図Ⅲ(2.5)-2 タービン発電機全体構造候補



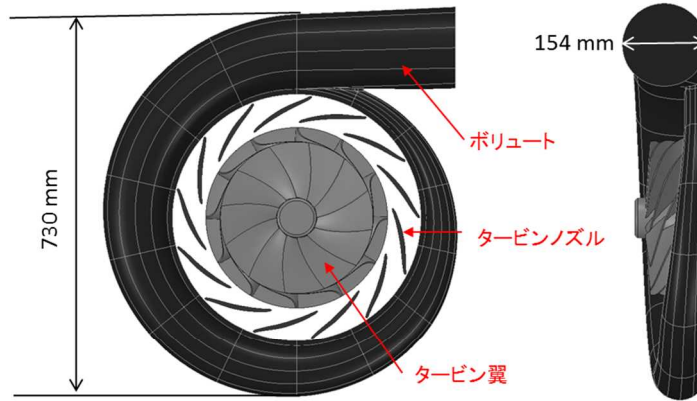
・曲げ固有振動: 667Hz (40071rpm)
 →ベンディングマージン: 3.9倍(390%): OK

・曲げ固有振動: 519Hz (31167rpm)
 →ベンディングマージン: 2.8倍(280%以上): OK

図Ⅲ(2.5)-3 回転体モデルとロータダイナミクス解析

⑤タービンの設計

CFD解析により、夏季、中間期、冬季の各々の作動条件で、最高効率を達成できるタービン翼形状を設計し、翼直径=0.343m、各期の回転数=7,000、8,000、8,500rpmで、断熱効率=約90%となった。この断熱効率を用いてシステム解析を実施し、発電出力は156kW（夏季）、225kW（中間期）、290kW（冬季）で、年間発電量=1,957,303kWhと推定され、年間システム効率（発電端）は7.8%で目標7%以上を達成できる可能性を得た。



夏季
中間期
冬季

Case	ER t-t	RPM	P01	T01	P_nozzle_TE	P02	P2	mass flow	Power	Power compared to the target	Efficiency t-t
[-]	[-]	[rev/min]	[kPa]	[K]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[kg/s]	[kW]	[-]	[-]
D	2.10	7,000	391	333.15	277.1	185.8	183.2	11.76	149.0	0.6%	90.6%
E	2.99	8,000	391	333.15	246.8	130.8	126.3	12.21	227.7	6.9%	91.1%
F	4.38	8,500	391	333.15	240.5	89.2	74.7	12.24	298.6	6.6%	89.0%

図Ⅲ(2.5)-4 ポリユート・タービンノズル・タービン翼の特性解析

タービン仕様	入口温度 Tin (°C)	入口圧力 Pin (kPa)	膨張比 π -	流量 F (kg/s)	断熱効率 η_t -	軸動力 W (kW)	熱効率 η_{sys} -
夏季	60.0	390.91	2.135	12.073	0.91	156.4	0.0577
中間期	60.0	390.91	3.015	11.980	0.91	224.5	0.0785
冬季	60.0	390.91	4.381	11.902	0.89	289.8	0.0966

最大発電出力（冬季）=289.8kW
 タービン断熱効率=(上記参照) 発電機効率=0.95
 インバータ効率=0.97 所内動力率=0.02



年間発電量 = 1,957,303kWh

年間システム効率(発電端) =7.8%

⑥タービン発電機詳細設計

発電機の冷却として作動媒体冷却を採用したときの下記条件でのタービン発電機の組み立て構造設計と各ユニット設計を実施した。

①発電容量＝250kW 回転数＝8,000rpm

②発電容量＝300kW 回転数＝8,500rpm

③発電容量＝300kW 回転数＝8,500rpm

(凝縮器出口から分配された作動媒体冷却)

⑦実用化・事業化検証

NEDO殿別受託研究にて、同じ媒体を使用したターボ圧縮機性能試験を実施し、目標性能を達成したことから、本委託研究で設計したタービンのもも十分適用でき、実用化が可能である。

年間販売台数が10台以上見込めれば4～5年で初期投資回収が可能となる。

表Ⅲ(2.5)-1 特許、論文、外部発表等

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表		
	国内	外国	PCT※ 出願	査読 付き	その 他	学会発表・ 講演	新聞・雑誌等 への掲載	その他
H27FY	0件	0件	0件	0件	0件	0件	0件	0件
H28FY	0件	0件	0件	0件	0件	0件	0件	0件
H29FY	0件	0件	0件	0件	0件	1件	0件	0件

(※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約)

[最終目標に対する成果と達成度]

表Ⅲ(2.5)-2 最終目標に対する成果と達成度

開発項目	開発目標	成果	達成度
①タービン発電機の検討	環境保全型作動媒体を用いた高効率タービン発電機の構築	ハイドロフルオロオレフィンを作動媒体にした発電システムの解析を完了した。	○ (達成)
②断熱効率達成の可能性検討	高断熱効率の遠心式タービンの構築 <タービン断熱効率 86%以上>	断熱効率 86%以上の遠心式タービンの基本設計を完了した。	○ (達成)
③発電機本体の設計	各種モータ冷却（水冷または媒体冷却）方式のタービン発電機の構築	水冷方式と媒体冷却方式のタービン発電機の基本設計を完了した。	○ (達成)
④磁気軸受搭載回転体設計	高耐久性高速回転体の最適構造の構築 <ベンディングマージン 30%以上>	磁気軸受け搭載の高速回転体の最適構造の基本設計を完了し、十分なベンディングマージン（200%以上）を確保した。	○ (達成)
⑤タービンの設計	最大断熱効率を得るタービン形状の構築 <システム熱効率 7%以上>	CFD解析により、夏季、中間期、冬季の各々の作動条件で、最高効率を達成できるタービン翼形状を設計し、タービン断熱効率=90%を達成し、年間システム効率（発電端）は 7.8%で目標を達成できる可能性を得た。	○ (達成)
⑥タービン発電機詳細設計	上記目標を達成するタービン発電機の構築	詳細設計図を完成した。	○ (達成)
⑦実用化・事業化検証	タービン発電機のコストの算定	4～5年での初期投資回収が可能な試算を得た。	○ (達成)

IV. 実用化に向けての見通し及び取り組みについて

実用化に向け、開発としては、実機(試作機)製作後、フィールド試験をパートナーと試験場の選定を決定し実施していくとともに、長期的な評価や熱交換器の開発等のシステム開発にも取り組んでいく必要がある。また、市場導入に向けて、エンジニアリングメーカーをはじめ、当社顧客との打合せ・調査をおこない、将来的な市場とパートナーの調査を行っている。

図 VI(2.5)-1 に商品化計画のイメージを示し、図 VI(2.5)-2 にそのフローチャートを示す。

機械コア部の主要部品・主要ユニットをトータルエンジニアリングメーカーへ供給し、エンジニアリングメーカーで総合組立、中央制御、パッケージング、工事を実施する。

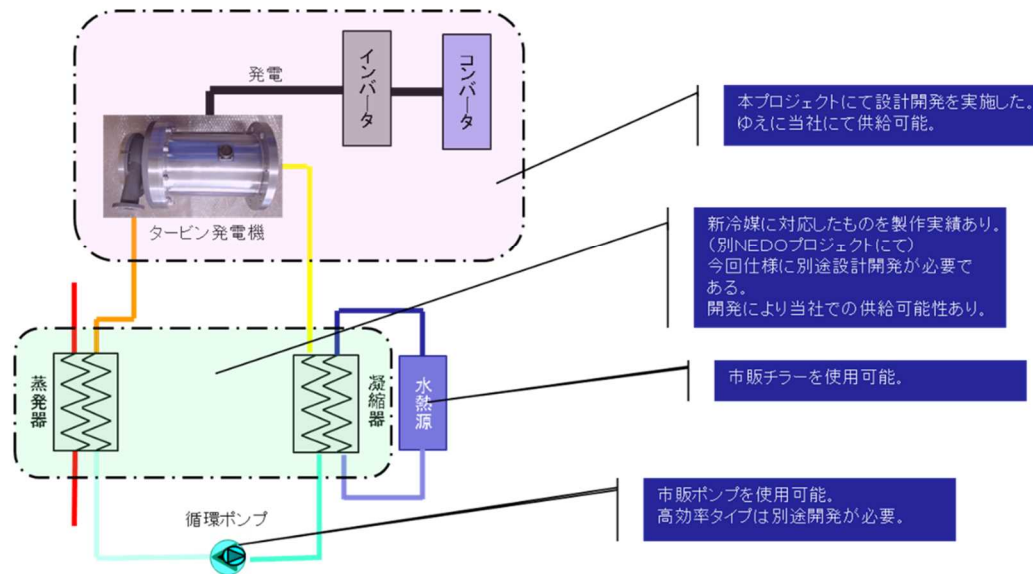


図 VI(2.5)-1 商品化計画

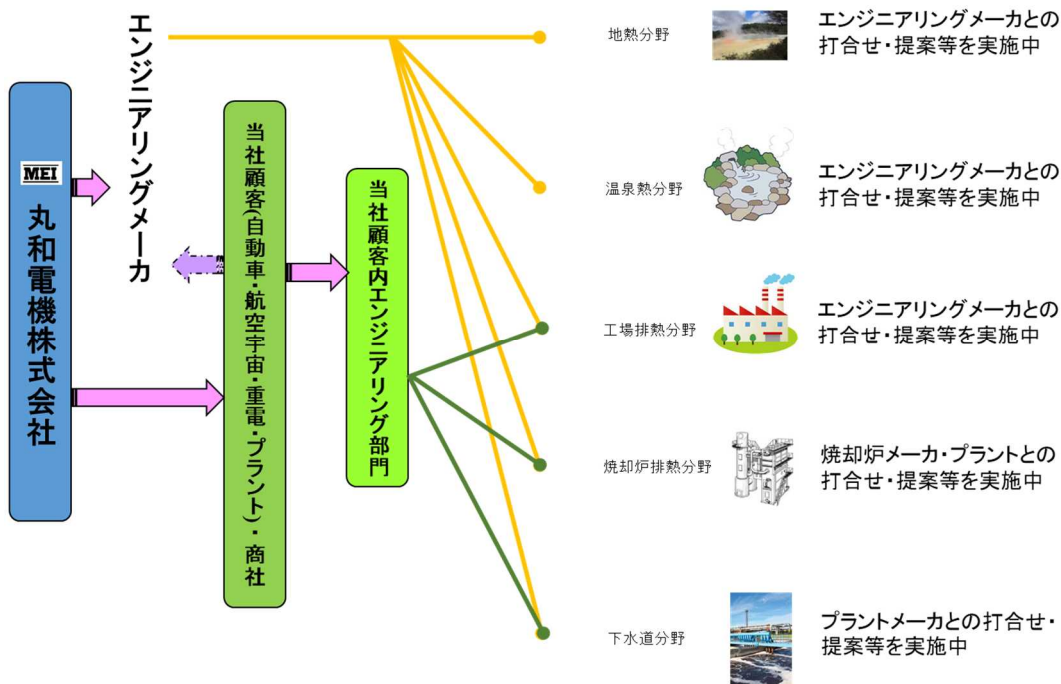


図 VI(2.5)-2 フローチャート

以上

個別テーマ(2.6)

(2)低温域の地熱資源有効活用のための小型バイナリー発電システムの開発

(2.6)炭酸カルシウムスケール付着を抑制する鋼の表面改質技術の開発

委託研究先:東京海洋大学、横浜国立大学、長崎大学、エディット

II. 研究開発マネジメントについて(事業の計画内容)

(2.6.1)背景と目的

低温地熱熱水を用いて発電出来る小型バイナリー発電は日本に適する発電方法として期待されている。実用化への課題の1つがスケール付着である。スケールの付着は配管閉塞や熱伝達の効率を低下させるため、メンテナンス無しでは地熱熱水の利用を継続出来ない。スケール対策には、硫酸を用いた薬品処理や機械的な除去処理等が主に採用されてきたが、前者は環境汚染への影響や災害時の化学薬品流出事故が懸念され、後者はコスト面で難がある。熱源の多くは国立公園内や温泉地等に立地しており、その利用には周辺環境や住民への配慮が欠かせない。環境への配慮とコスト面を両立する新しいスケール対策法の技術開発が急務である。そこで、環境に配慮した対策手法として炭酸カルシウムスケール付着を抑制する鋼の表面改質法を技術開発することを目的とする。

(2.6.2)研究開発の概要

一般的に使用されている炭素鋼等の材料表面組織を制御することにより、スケール付着量が低減される材料を表面改質材と呼ぶ(図II(2.6)-1)。

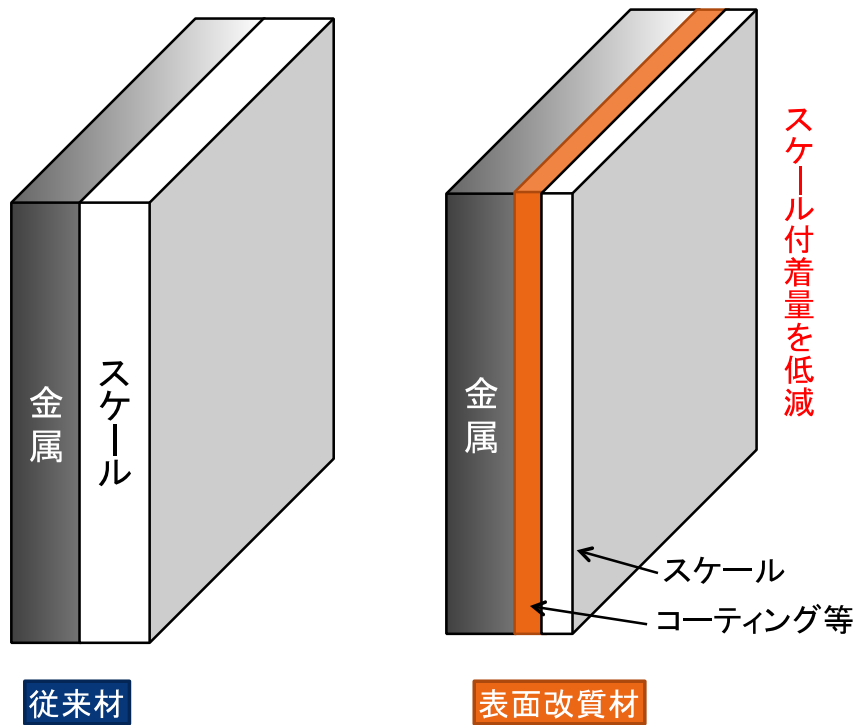
実験室レベルにおいて大きなスケール付着抑制効果を発揮する表面改質材を創製し、そのスケール抑制機構を明らかにする。また、並行して、発電プラント環境において付着したスケールを詳細解析し、発電プラント環境におけるスケール付着機構をモデル化する。また、スケール付着が伝熱性能に及ぼす影響を把握・解析し、温泉発電システム商用化の課題を整理する。

表面改質材は、炭酸カルシウムを主とするスケールが金属表面を覆う期間を延長する効果を有する材料である。図II(2.6)-2はその表面改質材の耐スケール効果の目標値を表した模式図である。ここで、金属表面全面を覆うまでのスケール付着量を A (またはスケール膜厚)とする。メンテナンスが必要となるまでの付着量を B とする。従来材において付着量 A となるまでの期間と付着量 B となるまでの期間はそれぞれ I_c と M_c である。目標とする表面改質材の耐スケール性能において付着量 A となるまでの期間と付着量 B となるまでの期間はそれぞれ I_d と M_d である。本テーマ内では従来材としてステンレス鋼SUS316を用いた。表面改質材の有する性能の目標値は2つある。1つは初期付着量に関する目標値である。従来材の初期付着量と比較して、表面改質材の付着量を4分の1にする。ここで、初期付着量とはスケールが材料表面をすべて覆うまでの期間の付着をいう。この時、付着期間は約4倍に延長されていると仮定する($I_d > 4I_c$)。もう1つはメンテナンス期間に関する目標値である。ここで、表面改質材の効果継続時間について考える。表面改質材は金属表面が地熱熱水に接触している状態で効果を発揮する。したがって、スケールが表面全面に付着した時、表面改質材はスケール抑制効果を失う。すなわち、従来材と同様の付着スピードでスケールが付着する。しかし、スケール付着量 A におけるスケール付着期間の延長は、スケール付着量 B となるメンテナンス期間を延長することができる。このような耐スケール性能を従来材に表面改質により付与し、実際の温泉発電プラントの環境にてメンテナンスが必要となるまでの運転期間を現在の使用材料の現況と比較して1.5倍以上に延長する($M_d > 1.5M_c$)。そして、開発鋼を用いた実際の温泉発電システムを運用する際のコスト含む商用化の課題を整理する。

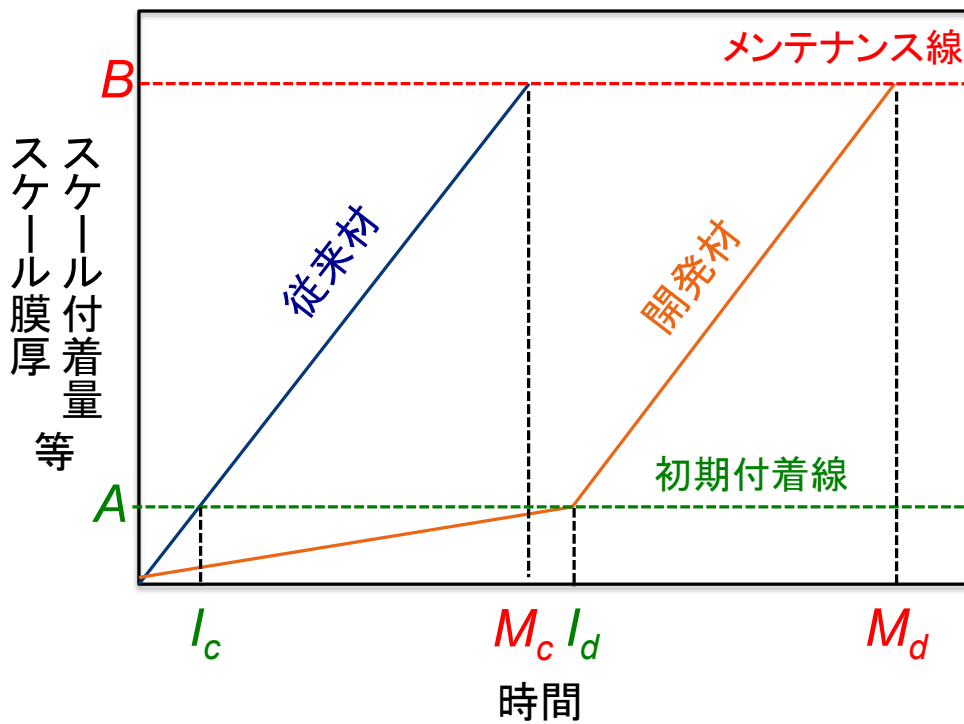
本テーマは以下の①-⑥の項目を実施し、目標の達成を目指す(表II(2.6)-1)。

- ①スケール付着箇所の把握と付着条件の検討
- ②スケール形成機構のモデル化
- ③スケールと伝熱性能の関係性評価

- ④表面改質材の開発およびスケール抑制機構のモデル化
- ⑤表面改質材の実地試験およびその伝熱性能評価
- ⑥スケール付着面からの最適運転方法の提案



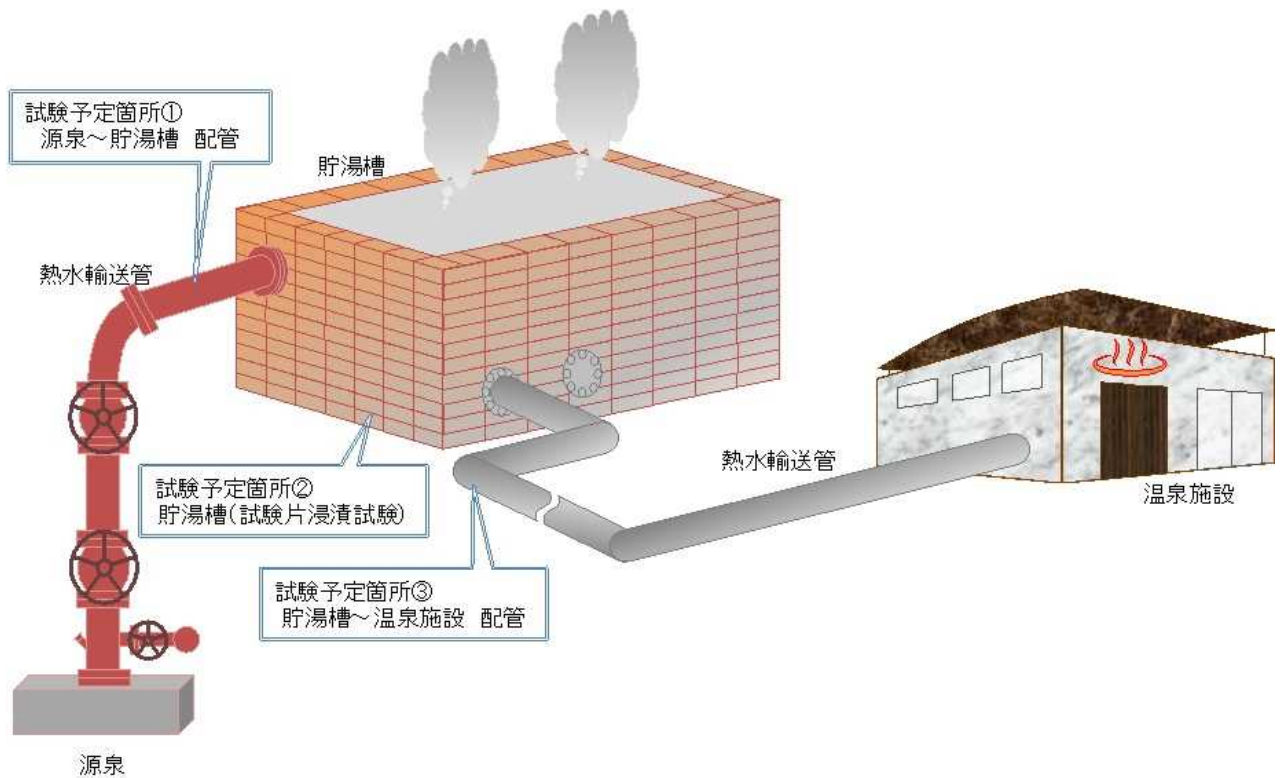
図Ⅱ(2.6)-1 スケール付着を抑制する材料の構成図



図Ⅱ(2.6)-2 スケール付着を抑制する材料の構成図

①スケール付着箇所の把握と付着条件の検討

実際の温泉発電プラント環境で使用される源泉周辺で実際に付着するスケールの化学分析、付着スピードなどを把握し、明確化する。長崎県雲仙市小浜温泉における実証実験では炭酸カルシウムのみならず、それと異なる様相のスケールが観察された。その要因を明らかにするために詳細な水質調査と付着スケールの関係性を行う。これらの結果を元に、炭酸カルシウムスケールの付着を促進する因子を検討する。また、熱水輸送管等でスケール付着を定量的に評価する手法がないため、本事業内でスケール付着量を評価する手法を確立する。2年度目以降、バイナリー発電施設内のスケール付着調査を詳細に行う。そして、実地試験する標準的な箇所を選定する(図II(2.6)-3)。開発表面改質材を用いた繰返しの試験を考慮し、工事システムのマニュアル化等の実地試験に向けた準備が必要とされる。実地試験場所として、温泉発電プラント環境で使用される熱水輸送管および発電所貯湯槽内、あるいは源泉付近の場所で行う。実地試験を実施するに当たっては、温泉事業者、行政、周辺居住者等との調整が必要であり、今後の研究調査への協力を依頼する。他の温泉地域においても小浜温泉で明らかになった付着機構を基に、今後の地熱・温泉発電の事業展開を目指す。また、他のスケール問題が生じている各温泉水を用いて、適用可能性とその効果について評価する。



図II(2.6)-3 熱水輸送システム及び実地試験箇所

②スケール形成機構のモデル化

一般的な物質の形成は核の発生と成長から成る。この観点に基づき、炭酸カルシウムスケール形成機構を明らかにする。炭酸カルシウム合成溶液を用い、鋼材にスケールを付着させ、電子顕微鏡を用いてスケール形成過程を解析する。はじめに、炭酸カルシウムスケールの成長機構を明らかにし、次に核発生機構について明らかにする。

スケールの付着量とその状況、特にスケール成長状況は流速により変化するといわれている。一般の熱交換で設定される流速と核の発生および成長との関係を伝熱の伴う状況で把握する。上述のスケール付着過程の解析結果を受けて、流れおよび伝熱特性へのスケール付着状況の影響を解析する。また、スケールの付着状況をもとに、流れおよび伝熱の特性の熱流動シミュレーシ

ンを行う。実地環境として小浜温泉におけるスケールの付着状況についてマクロとミクロの視点の双方からアプローチし、その機構を明らかにする。すなわち、流量の影響、配管形状の影響、付着過程の把握、ミクロ視点におけるスケール発生および成長を解析する。

③スケールと伝熱性能の関係性評価

スケールは伝熱性能を阻害する。そこで、スケール厚さと伝熱性能の関係性について明らかにする。これまでの、時間の経過とともにスケール付着量の増加および付着状況の変化が観測できた。伝熱材料として用いられる金属材料を試験材料として、伝熱特性を測定する実験装置を製作し、スケール付着量や付着の状況と、伝熱特性の関係、温度変化の影響を測定する。そして、表面へのスケール付着量あるいはその付着状況と伝熱性能との関係を把握する。

④表面改質材の開発およびスケール抑制機構のモデル化

表面改質材を作製しその特性を評価する。評価は炭酸カルシウムスケール付着加速試験を用いて実施する。年度毎の目標値として、スケール付着加速試験によって付着する炭酸カルシウムスケール付着量を、ステンレス鋼比で平成25年度に半分以下、平成26年度に4分の1以下にする。また、表面改質材使用時のスケール付着過程についても明らかにする。それらの結果を解析し、実地試験する表面改質材を選定する。流動環境中においても表面改質材の耐スケール性と耐食性について評価し、表面改質材使用に関する課題の抽出を行う。

⑤表面改質材の実地試験およびその伝熱性能評価

温泉発電プラント内やスケール付着が顕著な場所で実地試験するため、その箇所の設計や試験片を作製し、スケール付着試験をする。その場所で、表面改質処理を施した配管を製作し、試験する。そして、従来材と比較する。小浜での実証試験の結果から、バイナリー発電装置におけるスケールの付着状況と発電性能との関係を解析し、付着状況と伝熱特性の関係から発電システム性能への影響調査を実施する。そして、開発する材料の性能試験を行い、本事業内で確立するスケール特性の解析方法を用いて総合的に評価を行う。

⑥スケール付着面からの最適運転方法の提案

スケール付着面から考えた運転方法についてはこれまで詳細に研究されていない。①～⑤までの成果を踏まえて、伝熱流速、温度条件、および流速の非定常性や逆洗などの洗浄を考慮した最適な運転条件、ならびに耐スケール効果を有する表面改質材を使用する新規スケール対策法を提案する。実際の温泉発電プラントの環境にてメンテナンスが必要となるまでの運転期間を現在の使用材料の現況と比較して1.5倍以上に延長することを目標とする。

表Ⅱ(2.6)-1 研究開発目標と根拠

事業項目	研究開発目標	目標レベル設定の根拠
①スケール付着箇所の把握と付着条件の検討	スケール付着因子を整理する。	スケール付着機構および抑制機構を解明することにより、最適な表面改質手法を検討できる。
②スケール形成機構のモデル化	実験室および実地環境においてスケール付着機構を明らかにする。	明らかにした機構を元に付着量を低減する材料を作製し、その開発材の特性を実験室で評価する。
③スケールと伝熱性能の関係性評価	スケール付着が伝熱性能へ及ぼす影響を評価する。	スケール付着量などが発電量におよぼす影響を調査する。
④表面改質材の開発およびスケール抑制機構のモデル化	スケール付着加速試験を用いて、スケール付着量を現行材比で75%削減する材料を作製する。	実験室で試験したスケール付着量の小さい材料を分析し、その抑制機構を明らかにする。そして、耐スケール性能を有する材料を開発する。
⑤表面改質材の実地試験およびその伝熱性能評価	実地環境において開発材を試験する。そのスケール付着状態を評価し、現行材と比較する。また、開発材の特性を評価解析する。	表面改質の効果は金属表面と熱水が接触している状態で発揮される。したがって、長期特性を評価する。また、環境の影響も整理する。
⑥スケール付着面からの最適運転方法の提案	実際の温泉発電プラントの環境にてメンテナンスが必要となるまでの運転期間を現在の使用材料の現況と比較して1.5倍以上に延長するシステムを提案する。	開発鋼を用いた実際の温泉発電システムを運用する際における、コスト含む商用化の課題を整理する。

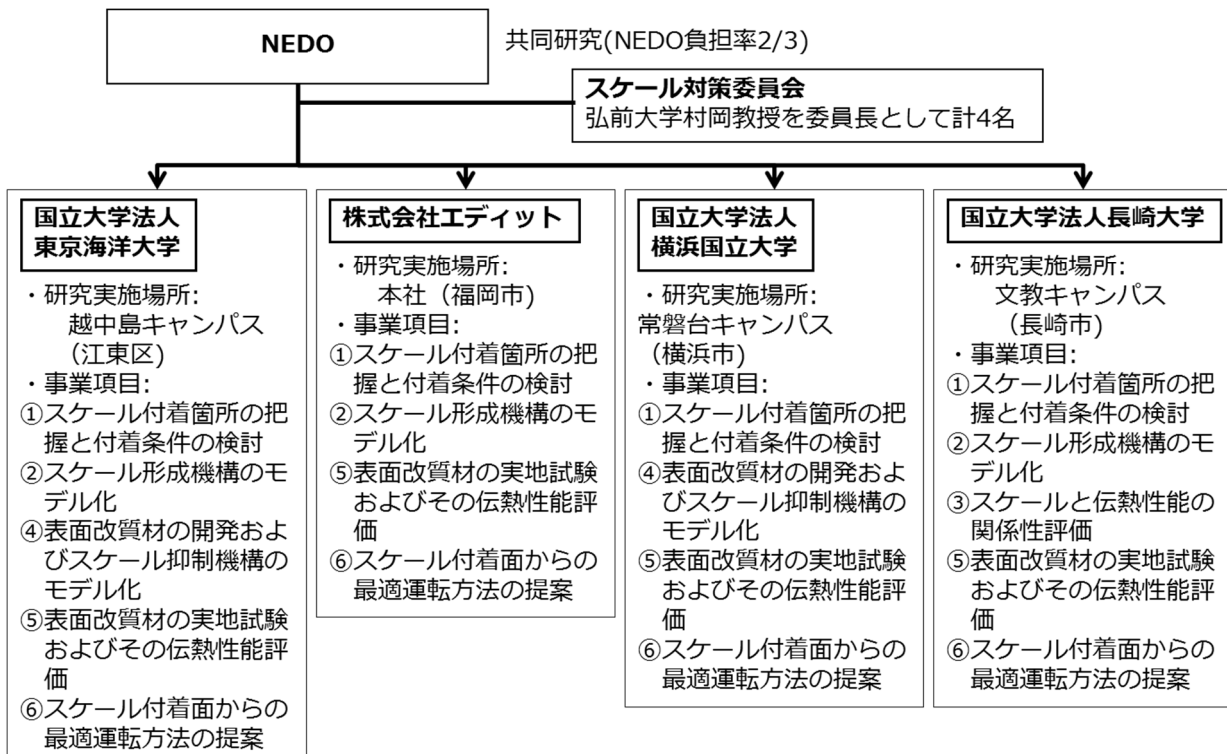
(2.6.3)事業スケジュール

本事業の研究期間は、平成25年8月1日より平成28年2月28日までで、主な事業スケジュールの概要を図Ⅱ(2.6)-3に示す。スケール対策委員会を延べ6回実施した。

事業項目	25年度				26年度				27年度			
	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q
①スケール付着箇所の把握と付着条件の検討			←————→									
②スケール形成機構のモデル化			←————→				モデル化					
③スケールと伝熱性能の関係性評価			←————→									
④表面改質材の開発およびスケール抑制機構のモデル化			←————→				表面改質材の作成		←————→			
⑤表面改質材の実地試験およびその伝熱性能評価							実地試験		←————→			
⑥スケール付着面からの最適運転方法の提案												←————→

図Ⅱ(2.6)-3 研究開発のスケジュール

(2.6.4)研究開発の実施体制



(2.6.5)研究開発の運営管理

表 II (2.6)-2 炭酸カルシウムスケール付着を抑制する鋼の表面改質技術の開発 スケール対策委員会
国立大学法人東京海洋大学
株式会社エディット
国立大学法人横浜国立大学
国立大学法人長崎大学

担当	氏名 (敬称略)	所属
委員長	村岡 洋文	国立大学弘前大学 教授
副委員長	本多 宣彰	一般社団法人小浜温泉エネルギー 代表理事
委員	野田 徹郎	国立研究開発法人産業技術総合研究所 顧問
委員 (2015年10月-)	紀平 寛	株式会社日鉄住金防蝕 技術開発部長

所属は、委員会組織時点のもの

Ⅲ. 研究開発成果について

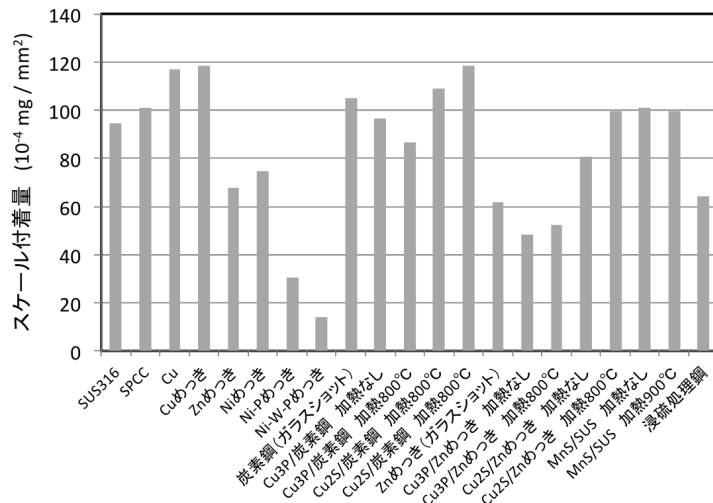
めっきによる表面処理及びショットピーニング等の表面改質処理を施した試験片に対し、スケール付着ラボ試験を実施し、各材料のスケール付着性について評価した。各材料の炭酸カルシウムスケール付着抑制効果を検討し、開発材の初期付着抑制効果を検証した。その結果、Ni-P及びNi-W-Pめっき材において、溶出イオンにより75%以上炭酸カルシウムスケールの付着を抑制する効果を得ることに成功した(図Ⅲ(2.6)-1)。

ラボ試験で効果が得られた開発材であるNi-W-Pめっき鋼の性能を温泉発電プラント環境で評価した。試験は、浸漬試験、流動環境試験(配管、熱交プレート)を実施した。各種実地試験の条件で、Pイオンの溶出によるスケール抑制効果は見られなかった。

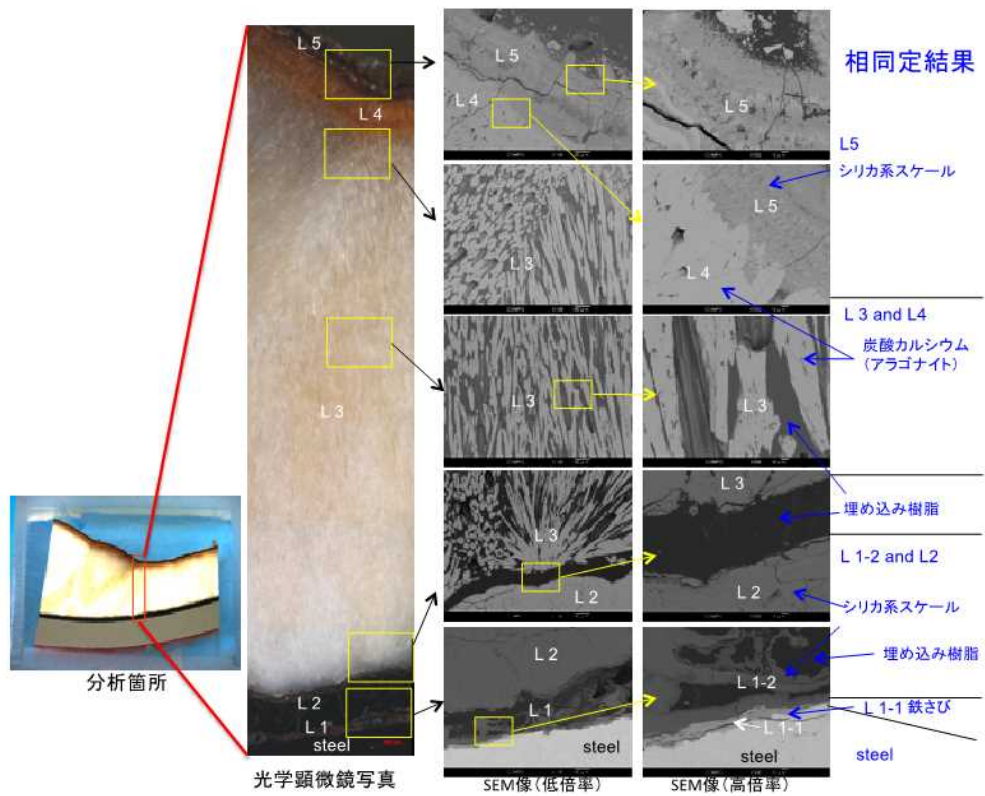
この要因を検討するため、実地環境(長崎県雲仙市小浜温泉)におけるスケール形成機構について、より詳細な解析を行った。またそれらを曝気の有無と付着スケールの関係性を整理し、以下を確認した。

- ・曝気前の配管の付着スケールの主成分は炭酸カルシウムスケールであった。
- ・曝気後の配管の付着スケールの主成分はシリカ系スケールであった。
- ・曝気の有無に関わらず初期付着スケールはシリカ系スケールであった(図Ⅲ(2.6)-2)。
- ・岐阜県飛騨温泉でのスケール付着した配管の分析を行った結果、同様のスケール層構造であることを確認した。
- ・これらのことからスケール形成過程として、初期に付着するスケールはシリカ系スケールであり、その後炭酸カルシウムスケールが付着するため、炭酸カルシウムスケールの付着を抑制する材料開発には、初期付着スケールであるシリカ系スケールを抑制する材料開発が必要であることが分かった。

また、長崎県雲仙市小浜温泉のオレンジベイ源泉における地熱熱水、蒸気の成分分析の結果を用いて、化学平衡計算からスケールを析出させない運転条件を検討した。結果として、地熱熱水は、CO₂を過飽和状態で含んでおり、CO₂分圧が低い時、大気中へCO₂が放出され、pHを上昇させるため、貯湯槽などの曝気槽を設置する場合は、地熱熱水の滞留時間や曝気度を配慮した運用が求められ、炭酸カルシウムスケールの付着か所を制御できる場合もあるとの結論を得た。



図Ⅲ(2.6)-1 スケール付着加速試験結果



図Ⅲ(2.6)-2 貯湯槽間の配管におけるスケール層構造

表Ⅲ(2.6)-1 特許、論文、外部発表等

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表		
	国内	外国	PCT※出願	査読 付き	その他	学会発表・ 講演	新聞・雑誌 等への掲載	その他
H25FY	0件	0件	0件	0件	0件	0件	0件	0件
H26FY	0件	0件	0件	1件	1件	5件	0件	2件
H27FY	1件	0件	0件	1件	0件	6件	0件	2件
H28FY	0件	0件	0件	3件	0件	0件	0件	0件
H29FY	0件	0件	0件	2件	0件	0件	0件	0件

(※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約)

[最終目標に対する成果と達成度]

表Ⅲ(2.6)-2 最終目標に対する成果と達成度

事業項目	最終目標 (平成 29 年度末)	成果	達成度
①スケール付着箇所の把握と付着条件の検討	スケール付着因子を整理する。	長崎県雲仙市小浜温泉におけるスケールメンテナンス頻度とスケール付着因子をまとめた。	○ (達成)
②スケール形成機構のモデル化	実験室および実地環境においてスケール付着機構を明らかにする。	スケール形成過程をモデル化した。	○ (達成)
③スケールと伝熱性能の関係性評価	スケール付着が伝熱性能へ及ぼす影響を評価する。	熱交換器に付着したスケールの詳細解析、スケール付着速度、スケール付着と伝熱性能について評価した。	○ (達成)
④表面改質材の開発およびスケール抑制機構のモデル化	スケール付着加速試験を用いて、スケール付着量を現行材比で 75%削減する材料を作製する。	実験室環境で、スケール付着量を 80%低減する材料を開発した。	○ (達成)
⑤表面改質材の実地試験およびその伝熱性能評価	実地環境において開発材を試験する。そのスケール付着状態を評価し、現行材と比較する。また、開発材の特性を評価解析する。	耐スケール効果を有する開発材を用いて実地試験し、スケール付着量に変化が見られなかった。その要因を特定した。	△ (一部未達) 初期のシリカ系スケールの付着抑制に焦点を絞った材料の探索と実証が必要
⑥スケール付着面からの最適運転方法の提案	実際の温泉発電プラントの環境にてメンテナンスが必要となるまでの運転期間を現在の使用材料の現況と比較して 1.5 倍以上に延長するシステムを提案する。	実際の温泉発電プラントの環境にてメンテナンスが必要となるまでの運転期間を現在の使用材料の現況と比較して 1.5 倍以上に延長する材料の設計指針とそのシステムを提案した。	○ (達成)

IV. 実用化に向けての見通し及び取り組みについて

本研究により、今後の取り組み方針として、初期のケイ酸マグネシウム付着抑制に焦点を絞った材料シーズの探索と実証が必要であることが示唆された。また、今回の開発材で剥離効果も見られたことから、コーティングによる付着抑制や剥離促進の可能性も視野に入れたシーズ探索を行っていく。

個別テーマ(2.7)

(2)低温域の地熱資源有効活用のための小型バイナリー発電システムの開発

(2.7)低温域の地熱資源有効活用のためのスケール除去技術の開発

委託先 国立大学法人大阪大学、国立研究開発法人産業技術総合研究所、株式会社超電導機構

II. 研究開発マネジメントについて(事業の計画内容)

(2.7.1)背景と目的

近年、比較的温度の低い蒸気や熱水でも、低沸点媒体を熱変換して利用することで発電可能なバイナリーサイクル発電(以下 バイナリー発電)発電の導入が米国を中心に進みつつある。特に、我が国では、低温地熱エネルギーの中でも温泉熱エネルギーが全国各地に分布し、温泉熱を発電に利用することで地域分散型の電源として活用できることから、バイナリー発電の導入拡大が期待されている。

本事業は地熱開発を促進する取り組みとして、地熱発電の導入拡大に資する革新的技術開発、すなわち、地熱資源の有効活用のためのスケール除去技術を開発することである。バイナリー発電は、低温の熱資源を発電に用いており、熱交換器でのスケール付着(とくにシリカ成分のもの)が問題になっている。このシリカスケールに関しては析出してくるメカニズムが複雑であり、対策が難しい。特に、温泉水は多くの溶存成分を含み高濃度であるため、ボイラ給水中の水と比較してはるかに多くのスケール物質が析出する。そのため、温泉水中で発生するスケールを抑制することが求められている。本研究開発によりスケール除去が、スケール以外の源温泉水の成分を変えずに、高速にそして安価に実現することにより、温泉発電の実施が加速され、大きな経済効果をもたらすことが目的である。

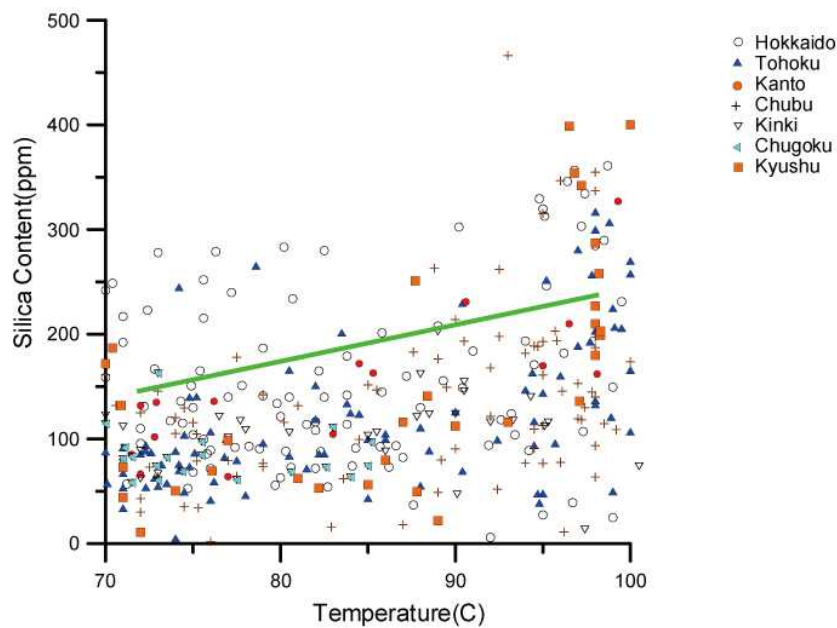
(2.7.2)研究開発の概要

低温域の地熱資源有効活用のためのスケール除去技術の開発

- ・磁気分離による温泉水内シリカ除去のための磁気シーディング工程の評価を実施し、磁気フロックの生成方法と磁気分離方法の設計指針を示した。
- ・温泉水処理能力 5t/h の小型磁気分離装置を製作し、温泉地で実証試験を行った。
- ・既存の温泉データを収集し、温泉発電のポテンシャルを有する地域を抽出するとともに、化学分析値から、シリカスケールの発生する可能性がある温泉の推定を行った。

スケール対策として、スケールが析出する前段において分離除去を行う革新的なスケール除去装置を開発する。具体的には、温泉水からスケールの原因物質であるシリカや炭酸カルシウムなどを含むスケールの除去を行ない、シリカとして200ppmから150ppm程度まで低減させることが可能な磁気分離装置を開発する。

産総研では「深層地下水データベース(高橋ほか、2011)」を構築しており、この中に温泉水の化学分析値などが含まれている。このデータベースには、17,582坑のデータが収録されており、その中で温泉発電に使用できる70℃以上の温泉データは、2196である。この温泉データの中からSiO₂の濃度測定がされている393データを地域別に温度との相関について示す。



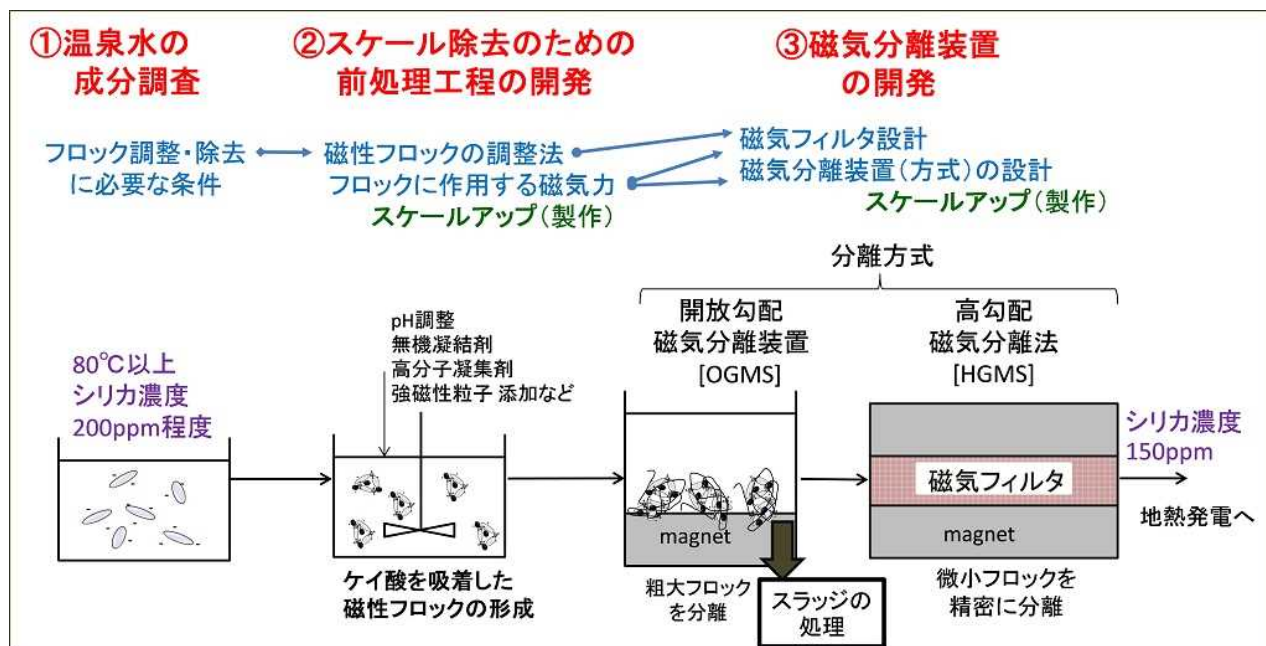
図Ⅱ(2.7) - 1 地域別温泉水温度とシリカ濃度

図Ⅱ(2.7) - 1より、北海道のデータはどの温度範囲においてもシリカ濃度がやや大きくなる傾向がある。この北海道のデータのうち、シリカ濃度の高いデータを除いて考えると、ほぼ全国的に図中の緑の線で示した温度とシリカ濃度の関係よりも下の範囲にデータがプロットされ、温泉水に溶存し得るシリカ濃度の上限を示唆していると考えられる。この図から分かるように70°Cにおける温泉水のシリカ濃度は150ppmであることから、シリカ濃度を150ppm以下に下げることができればシリカ成分の析出(シリカスケール)を抑えることができると想定される。よって本装置はシリカ濃度を200ppm程度から150ppmまで低下させることを目標とする。また、本研究においてシリカ濃度と析出するメカニズムを確認し、効率的なシリカ除去システムを構築する。

※参考文献

高橋正明・風早康平・安原正也・塚本齊・佐藤努・高橋浩・森川徳敏・大和田道子・尾山洋一・芝原暁彦・稲村明彦・鈴木秀和・半田宙子・仲間純子・松尾京子・竹内久子・切田司・大丸純(2011)深層地下水データベース.地質調査総合センター研究資料集, no. 532, 産業技術総合研究所地質調査総合センター

研究体制として、国立研究開発法人産業技術総合研究所、国立大学法人大阪大学、株式会社超電導機構の3グループによって、それぞれ、主として①スケール成分の調査、②スケール除去のための前処理工程の開発、③磁気分離装置の開発が行われている。磁気分離装置の開発項目を図(2.7) - 2に示す。本事業での研究項目およびその内容は以下の通りである。



図Ⅱ(2.7) - 2 磁気分離装置の開発項目

①スケール成分の調査

バイナリー発電では、70°C程度が発電を実施できる最低温度とされていることから、本事業では、実用的な温泉発電として80°C以上の温泉資源を発電可能な最低温度として設定する。この80°C以上の温度を持つ温泉に対して70°Cまでの熱温度差による発電を行うことを検討する。温泉資源に含まれるスケールには、大きく分けてシリカスケールと炭酸カルシウムスケールがあるが、炭酸カルシウムスケールは、薬剤や酸を加えて処理をすることにより比較的容易に除去することが可能であり、本提案における磁気による分離は、シリカスケールにも有用と考えられることから、温泉の主にシリカスケール成分を分析する。この化学分析結果は、温泉水が地下の温泉帯水層にあるときの温度(地化学温度)を推定することに活用できる。温泉帯水層温度が推定できれば、坑井を掘削して温泉を採取している温泉(<100°C)でも、坑井から直接温泉発電に熱水を導入した場合(>100°C)でも、導入時にシリカ成分がとり得る濃度範囲を予測できる。また、開発中の磁気分離装置に必要な薬剤添加量の参考となる。以上のような目的のため、80°C以上の温泉を調査し、その温泉に含まれるシリカや他の化学成分の分析を行う。

②スケール除去のための前処理工程の開発

溶解しているシリカをフロック化する際に、薬剤の添加量や種類によって、調製されるフロックの性状が変化するため、コストと性能を加味した上での磁性フロックの調製が必要である。さらに調製されたフロックを磁気分離装置で処理する際には、その粒子径や磁化率が分離に必要な磁気力として重要であり、それらを考慮したうえで分離領域での処理流速と磁気フィルター形状・線径などの諸条件が決定される。前処理工程のスケールアップに伴い、フロック調製の薬剤添加量やその添加方法および攪拌方法の調整が必要となるため、様々な温度や流速条件にも安定な取り扱いができるフロックを形成について、薬剤コストを考慮しての検討を行う。

③磁気分離装置の開発

市場調査を踏まえ、実現可能なシリカ除去のための磁気分離システムを構築する。スケールアップに伴う様々な解決すべき課題を整理し、当該装置を出力50kW程度の温泉バイナリー設備用磁気分離装置として採算が取れる価格や実現可能性を検討の上、出力50kW程度の温泉バイナリー設備用磁気分離システムの概念設計を行う。

表Ⅱ(2.7)-1 研究開発目標と根拠

事業項目	開発目標	目標レベル設定の根拠
① 市場調査	シリカ除去対策用磁気分離装置の必要性についての調査	装置価格やランニングコストなど事業および研究を進めるために必要な目標値の設定
② 地熱水シリカ対策用磁気分離装置の概念設計	地熱水シリカ対策用磁気分離装置の概念設計を行う	シリカ除去用磁気分離方法の確認のため
③ モデル装置試作試験	地熱水シリカ対策用モデル装置試作試験	小規模現地実験運転を実施
④ 磁気力制御を利用したシリカ分離、基礎実験装置作製と試験	磁気力制御を利用したシリカ分離基礎実験装置作製と試験	磁気分離を行うための薬剤処理と形成された磁性が付与されたシリカフロック（磁性フロック）により、磁気分離でシリカを低減できることを確認するため
⑤ 磁気分離システムの設計・検討	④で得られた結果を基に小規模な磁気分離システムを試作し実温泉水を用いて磁気分離試験	実温泉水条件下での磁気分離装置の有効性の確認
⑥ 温泉資源の調査と含まれるスケール成分の分析	全国の高温泉の現状調査	高温泉の現状調査をもとに、開発中の磁気分離システムの市場性（適合性）を検証するため
⑦ 磁場設計、流体設計、フィルター設計	開発項目④⑤で調製された磁性フロックを磁気分離するための磁気力算出、および磁場設計	開発中の磁気分離システムを実温泉の流量に対応させるため
⑧ 5 t/h磁気分離装置設計試作	開発項目②～⑥の結果を受けて、5t/h用に最適な磁気分離装置を設計・試作	5t/hの流量に対応する装置スケールアップを行うため
⑨ 5 t/h磁気分離装置運転・試験	開発項目⑧で製作した磁気分離システムで現地試験の実施	シリカを問題とする温泉水のケースについて現地試験を行い、装置開発の知見を抽出する。
⑩ 30 t/h磁気分離装置設計 試作・検討	実用化に向けて処理量の増大30 t/hを図り（10t/h×3台）磁気分離装置設計後、装置構成や配置の検討	流量増大に伴う装置負荷や薬剤投入法均一化など予想される問題点の抽出
⑪ 1 t/h磁気分離装置設計試作	連続処理型1t/h磁気分離システムの設計試作	全自動連続処理1t/h磁気分離装置により、30t/hの磁気分離システムの構築に考えられる検討改善点を試験的に評価する
⑫ 1t/h磁気分離装置連続運転・試験	磁気分離装置の試験候補地の選定、試験に必要な薬剤量を算定後、試作した1t/h磁気分離システムの連続運転試験	連続運転や実用化に必要な課題を抽出するため
⑬ 地熱水シリカ対策用磁気分離システム評価	実用化に必要な目標値や課題を抽出	実用化に必要な目標値を決定し、装置可動中に起こると想定される問題点などを抽出し改善するため

⑭ 実用機設計、全体システム設計	10t/hの実用機設計とそれに付随する全体システム設計	イニシャルコストやランニングコストを試算するため
⑮ ビジネスプランの検討	開発項目①、⑥、⑭の調査解析結果をもとに、ビジネスプランの検討	開発中の磁気分離システムの市場性を確認するため

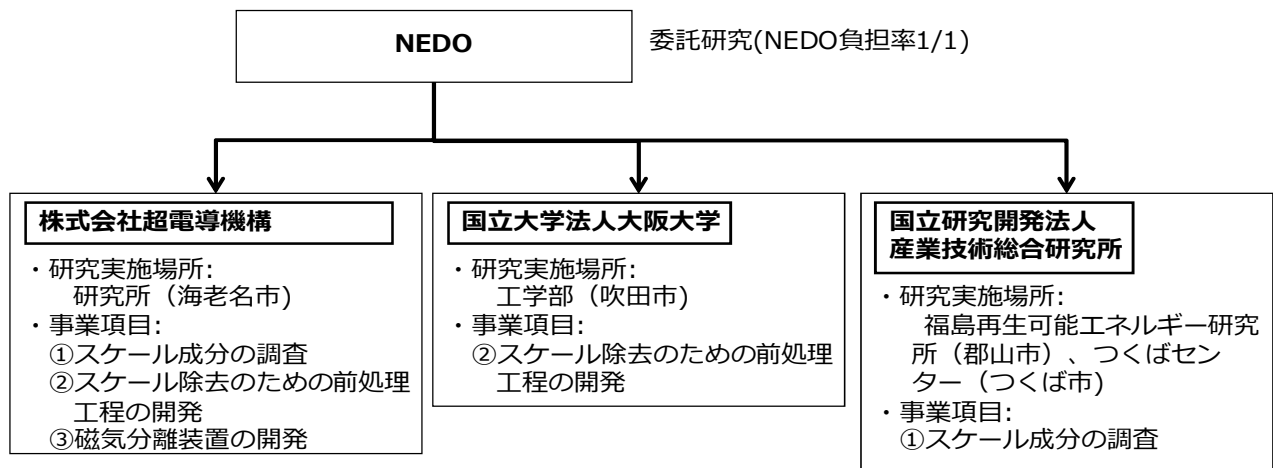
(2.7.3)事業スケジュール

本事業の研究期間は、平成25年8月1日より平成28年2月28日までで、主な事業スケジュールの概要を図Ⅱ(2.7) - 3に示す。平成25年度後期から平成26年度にかけてシリカ成分の分離のための前処理と磁気分離装置の適用方法の検討と設計を行い、実験装置の製作し試験を実施し、平成27年度には実用化ベースの処理装置の制作と評価を実施した。

研究開発項目	25年度				26年度				27年度			
	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q
①市場調査			→									
②地熱水シリカ対策用磁気分離装置の概念設計			→									
③モデル装置試作試験			→									
④磁気力制御を利用したシリカ分離基礎実験装置作成と試験			→									
⑤磁気分離システムの設計・検討			→									
⑥温泉資源の調査と含まれるスケール成分の分析		→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→
⑦磁場設計、流体設計、フィルター設計					→							
⑧5t/h磁気分離装置設計試作						→						
⑨5t/h磁気分離装置運転・試験							→					
⑩30t/h磁気分離装置設計試作・検討									→			
⑪1t/h磁気分離装置設計試作											→	
⑫1t/h磁気分離装置連続運転・試験											→	
⑬地熱水シリカ対策用磁気分離システム評価											→	
⑭実用機設計、全体システム設計											→	
⑮ビジネスプランの検討											→	

図Ⅱ(2.7) - 3 研究開発のスケジュール

(2.7.4)研究開発の実施体制



Ⅲ. 研究開発成果について

地熱資源の有効活用のためのスケール除去技術の開発として、温泉水中に溶解するシリカについて強磁性のシリカフロックを調製する。そのシリカの除去を高速にそして安価に実現するための磁気分離装置の設計および製作とその性能評価試験を実施した。以下の成果を得た。

- ①スケール成分の調査
 - ・ 温泉資源の調査と含まれるスケール成分の分析
- ②スケール除去のための前処理工程(磁気シーディング工程)の開発
 - ・ 薬剤添加量に関するコスト削減
- ③磁気分離装置の開発
 - ・ 処理量5t/hの磁気分離装置の作製およびその評価試験
(磁気分離装置作製に関しては、磁気フィルターの評価なども含む。)
- ④ビジネスプランの検討

Ⅲ-①スケール成分の調査

温泉発電ポテンシャル地域として湧出温度 80℃以上の源泉を有する温泉 63 ヶ所について、温泉の現状調査と、温泉水とスケールの試料採取と化学分析を行い、温泉の地質概要、泉質型、塩濃度、水の起源等を整理した。温泉水の溶存シリカ濃度が高かった温泉は、主に火山フロント沿いに分布する中～低塩濃度の Na-Cl 型～Na-Cl・SO₄ 型泉質の天水起源であり、シリカ濃度の最大値は SiO₂ として約 540mg/L であった。温泉水のシリカスケール発生可能性は、次の 3 つの基準を参考に整理した：(A) 坑内や貯湯槽等に実際にシリカスケール発生が認められたもの、(B) 温泉水の溶存シリカ濃度が熱交換器の温度範囲 (70℃以上) に相当する非晶質シリカの溶解度 (約 250mg/L) より高かったもの、(C) 各種地化学温度計で推定した温泉帯水層温度が 180℃以上 (溶存シリカ濃度が 250mg/L の時の石英温度計温度) であったもの。これら (A)、(B)、(C) の各々に該当した温泉は 6 (非晶質シリカ 5、スメクタイト (含 Si 成分) 1)、12、25 ヶ所であった。以上の結果は、本事業で開発した磁気分離システムの、開発済み温泉地への適用における市場可能性規模を示すと考えられる。

Ⅲ-②スケール除去のための前処理工程(磁気シーディング工程)の開発

本事業では平成 25 年度 0.5t/hの磁気分離装置を作製し、評価試験を実施し、鉄系凝結剤でシリカを共沈させマグネタイトの添加でフロックを強磁性化し高分子凝集剤でフロックを包含することにより磁気分離が可能であることを確認したが、薬剤添加量に関するコストを低下させる課題が残された。

これを受けて平成 26 年度にはコストの低下を一つの大きな目標として取り組むことになり、平成 25 年度に弟子屈温泉から得た情報から実用化のためのランニングコストの目標を 10,000(千円/年)以下として、入手した温泉水を用いてラボスケールの実験を行った。その結果、弟子屈温泉水では PFS(ポリ硫酸第二鉄)の代わりに塩化第一鉄(FeCl₂)溶液を使用することによりその添加量を 0.03～0.05%程度まで低減することが可能であることが検証された。それに伴って pH 調製に必要な NaOH 量も低減可能になった。さらに、マグネタイト添加量も 100ppm(昨年度)から半減させた 50ppm で磁気分離試験での良好な分離性が得られた。

上記した弟子屈温泉水での平成 26 年度の成果を基に薬剤コストを、年間薬剤コストとして 6,000～9,000 千円まで低減可能であることが判明した。

シリカ含有量の高い温泉水にも本手法は有効であるが、濃度が高い場合にはそれに伴い薬剤添加量も増加するためコストも増加すると考えられる。500ppm 前後の高濃度の温泉水に関して塩化第一鉄(FeCl₂)溶液が平成 25 年度に使用されたポリ硫酸第二鉄よりシリカスケール除去率が高いことも平成 26 年度までの実験より示された。

Ⅲ-③磁気分離装置の開発

当初はラボスケール同様に弟子屈温泉での試験を予定したが、現地の気象条件等から不可能になり、

新たな実験サイトとして湯布院温泉が選定された。対象となった湯布院温泉水の特徴としてはシリカ含量が弟子屈温泉水(160~200ppm)と比較して、450~500ppmと高いことが挙げられた。ラボスケールで試験の結果、シリカ濃度を100~150ppm程度に低下させるための薬剤が多く必要なことが判明したが、磁気分離の装置の分離機構の評価試験として処理量5ton/h(実際は200L/2min)の現地試験は湯布院温泉で実施した。磁気分離装置によるSiO₂の除去率は、ラボスケール試験のデータを再現し、流量を100~150L/min(6t~9t)と変化させて処理した場合にも磁気分離としてほぼ良好な結果を得ることができた。

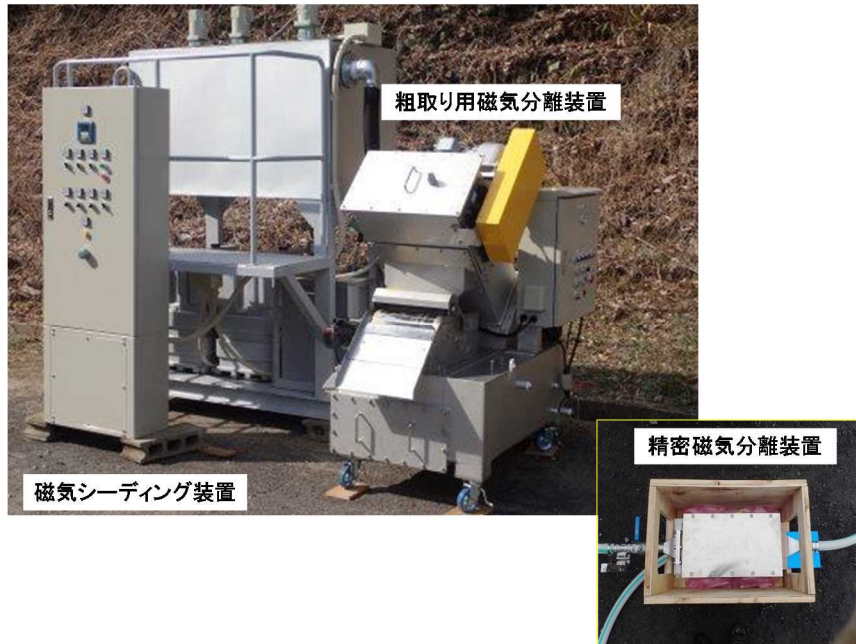
磁気フィルターの線径などは平成25年度の計算データによって決定されたが、実際の調製された磁性フロックの性状(実験サイトのシリカ濃度が高く、弟子屈に比べ柔らかい)から、流れによってフロックが抜け易かったが、その抑制のためにネット状の磁性細線を使用し、フィルターの配置を検討したことで、フロック抜けのない結果を得ることができた。

磁気分離機構の設計概念として、平成25年度に温泉中のシリカを強磁性フロックとして共沈後、大きなフロックに関しては、開放勾配磁気分離装置[OGMS: OPEN GRADIENT MAGNETIC SEPARATION](磁石の持つ磁場空間: 分離空間が広い)で処理し、そこを抜けてくる小さいフロックに関しては高勾配磁気分離法[HGMS: HIGH GRADIENT MS](磁石の磁場空間に磁性細線を設置し強力な磁場を発生させる手法: 分離空間は狭い)を使用するという方法を提案した。平成26年度はOGMSを電磁石で行い、HGMSを永久磁石で行った。HGMSに関しては平成25年度に電磁石で行った場合、磁場領域が小さいことでフロックが閉塞しやすい問題が永久磁石で磁場領域を広く確保したことで解消された。HGMS用のフィルターの洗浄も磁気フィルターを磁場外に出すことで行えることが確認できた。OGMSの磁場発生源を永久磁石から電磁石に変更した理由として、処理量の増大に伴い、OGMSで処理する磁性フロックも増したため、磁性フロックを磁場のON/OFFによる洗浄の容易さを重視した。評価試験のフロックの捕捉は十分であった。

以上から処理量5 t/hの磁気分離装置として性能は実用化に向けて進展しているが、連続処理を行うにあたり課題点も示された。

研究開発を進める過程で、スケールアップに伴い、捕捉した磁性フロックも増加し、それを系外に引き抜くことが、装置機構として重要であるとし、平成27年度にも大きな仕様変更を行った。そこで装置の試作については、1 t/hの仕様で、磁性を付与された磁性フロックを連続的に装置の系外に引き抜く磁気分離装置の試作を行った。

本地熱水シリカ対策用磁気分離システムは磁気シーディング装置、粗取り用磁気分離装置、精密磁気分離装置から構成される。処理能力の大幅改善と連続運転を行うため、磁気シーディング装置と粗取り用磁気分離装置を新たに設計試作した。本地熱水シリカ対策用磁気分離システムに1t/h 処理用として製作された磁気シーディング装置、粗取り用磁気分離装置、精密磁気分離装置の写真を図Ⅲ(2.7)-1.に示した。

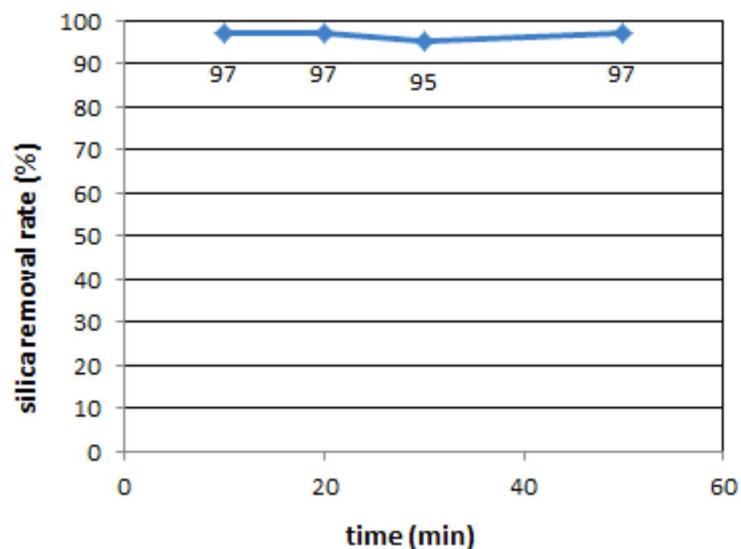


図Ⅲ(2.7)-1. 地熱水シリカ対策用磁気分離システム(1t/h 処理用)の構成装置の写真

製作した処理量1t/h の地熱シリカ対策用磁気分離システムの連続運転試験を行い、その性能について評価する。装置規模を考慮し、運転試験は福島県の南相馬の工場内の敷地を借り実施した。

磁気シーディング装置内では連続して安定した粗大磁性フロックが調整され続け、粗取り用磁気分離装置に流入した粗大磁性フロックは安定して捕捉され続け脱水された。本試験で1t/h の粗取り用磁気分離装置の処理性能は、温泉水の泉質によるフロックの強度によるものに起因している可能性もあるが、精密磁気分離装置の必要性や優位性を感じさせないほどの高さを示した。また、永久磁石プレートは通常のOGMS と異なり、内挿される角形磁石のエッジ部が高勾配磁場を形成するため、微小磁性フロックも磁石の形状によるHGMS 効果により捕捉されている可能性も高いと思われる。

最終的に精密磁気分離装置を通過したシリカ濃度（処理後5ppm 以下、シリカ除去率95%）は低減され続け、安定してシリカを分離することが可能なシステムであることが確認された。その分離の経時変化を図Ⅲ(2.7)-2に示した。



図Ⅲ(2.7)-2. 1t/h 連続運転試験のシリカ除去率の経時変化

III-④ ビジネスプランの検討

出力50kW 程度以上の温泉バイナリー設備用磁気分離システムを開発した場合の、本装置による方法と、通常のスケール対策処理法との詳細なコスト比較を実施し、採算性のある装置の開発見込みを提示し、ビジネスプランを作成した。

設備利用率は80%として計算（出典：コスト等検証委員会）。発生電力量45kWh のマイクロバイナリー発電システム72kWh の所内動力を25%として試算した値を用いた。一般には高濃度のシリカが溶存する温泉水にシリカスケールができやすいとされているが、温度70℃での非晶質シリカの溶解度より高い温泉水であれば、比較的低濃度でもシリカスケールは形成される。詳細にはシリカスケールの発生機構や発生時間までは解明されておらず、今回試験で使用した弟子屈のような薬剤のランニングコストが抑えられる温泉水について試算を行った

試算の結果、シリカの溶解度が低い場合であれば、採算性ある見込みが得られた。この試算では、装置価格は800 万円と本事業開始当初に製作予定していた装置価格であり、性能と安定性を考慮すると初期投資として装置価格に2000 万円ほど必要となってくるため、まだ現状ではすぐにビジネスに広がる状況にはないと考える。

また平成25年度の市場調査（弟子屈温泉）のようにスケール対策に年間1000 万円以内という回答を基に試算すると、ランニングコストについては200～250ppm 前後のシリカ濃度の温泉水には対応可能であることが示された。

表III(2.7)-1 特許、論文、外部発表等

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表		
	国内	外国	PCT※ 出願	査読 付き	その他	学会発表・ 講演	新聞・雑誌等 への掲載	その他
H25FY	0件	0件	0件	0件	0件	0件	0件	0件
H26FY	0件	0件	0件	0件	0件	4件	0件	0件
H27FY	0件	0件	0件	0件	0件	3件	0件	0件
H28FY	0件	0件	0件	0件	0件	1件	0件	0件
H29FY	0件	0件	0件	0件	0件	1件	0件	0件

(※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約)

[最終目標に対する成果と達成度]

表III(2.7)-2 最終目標に対する成果と達成度

開発項目	開発目標	成果	達成度 ○ (達成) △ (達成見込み) × (未達)
① 市場調査	シリカ除去対策用磁気分離装置の必要性についてまとめる	バイナリー発電施設の導入の際には、熱交換器の熱水が流入する前工程でシリカが除去出来るシステムに対するニーズがあることが確認された。	○ (達成)
② 地熱水シリカ対策用磁気分離装置の概念設計	地熱水シリカ対策用磁気分離装置の概念設計を行う	地熱水シリカ対策用磁気分離装置は、磁気シーディング工程と磁気分離工程の2工程を必要とし、2つの装置構成で概念設計をした。	○ (達成)
③ モデル装置試	地熱水シリカ対策用モデル装置試作試験	概念設計を基に試作した地熱水シリカ対策用磁気分離装置	○ (達成)

作試験		を温泉サイト（小浜）で試験を実施し、適用可能なことを示した。	
④ 磁気力制御を利用したシリカ分離、基礎実験装置作製と試験	磁気力制御を利用したシリカ分離基礎実験装置作製と試験	薬剤および濃度の決定後装置試作を実施した。	○（達成）
⑤ 磁気分離システムの設計・検討	開発項目④で得られた結果を基に小規模な磁気分離システムを試作し実温泉水を用いて磁気分離試験を行う	試作機により地熱水中のシリカ（小浜温泉）を除去できることを確認した。連続処理には薬液注入システムの自動化および捕捉した磁性フロックの系外への連続的な排出が必要なことが確認された。	○（達成）
⑥ 温泉資源の調査と含まれるスケール成分の分析	温泉発電の可能性のある地域の温度80℃以上の温泉水を採取しシリカ濃度等の化学分析を行う	現地調査結果に基づきシリカスケール発生の可能性がある地域を抽出した。	○（達成）
⑦ 磁場設計、流体設計、フィルター設計	開発項目④⑤で調製された磁性フロックを磁気分離するための磁気力算出、および磁場設計	磁場解析・流体解析および粒子軌跡計算により磁気フィルター・磁場強度を決定した。	○（達成）
⑧ 5 t/h磁気分離装置設計試作	開発項目②～⑥の結果を受けて、5t/h用に最適な磁気分離装置を設計・試作する	設計・試作を行った。	○（達成）
⑨ 5 t/h磁気分離装置運転・試験	開発項目⑧で製作した磁気分離システムで現地試験の実施する	湯布院（シリカ濃度 450ppm）で現地試験を実施し、小規模試験に比べ薬剤添加量に対するシリカ除去率が低下した。処理量の増大により、薬剤添加速度やかくはんによる薬剤反応速度の遅れやpH制御の改善など、また、かくはん速度・かくはん翼の大きさなどが問題点として抽出された。	○（達成）
⑩ 30 t/h磁気分離装置設計試作・検討	実用化に向けて処理量の増大30 t/hを図り（10t/h×3台）磁気分離装置設計後、装置構成や配置の検討を行う	小容量のシステムであれば余剰の温泉水量が少ない温泉にも適用でき、本システムの適合地が多くなるため、⑩のシステムを元に、様々な容量に対応可能な小さいシステム（具体的には10t/hのシステム）を複数台設置して10t/hを3台設置し運用することとし、実用機設計を行った。	○（達成）

⑪ 1 t/h磁気分離装置設計試作	連続処理型1t/h磁気分離システムを設計・試作する	地熱水シリカ対策用磁気分離システムは磁気シーディング装置、粗取り用磁気分離装置、精密磁気分離装置から構成した。連続運転を行うため、磁気シーディング装置と粗取り用磁気分離装置を新たに設計試作した。	○ (達成)
⑫ 1t/h磁気分離装置連続運転・試験	磁気分離装置の試験候補地の選定、試験に必要な薬剤量を算定後、試作した1t/h磁気分離システムの連続運転試験を行う	精密磁気分離装置を通過したシリカ濃度（処理後 5ppm 以下、シリカ除去率 95%）は連続して低減され続け、安定してシリカを分離可能なシステムであることが確認された。	○ (達成)
⑬ 地熱水シリカ対策用磁気分離システム評価	実用化に必要な目標値や課題を抽出する	シリカ含量が 200ppm 程度の場合にはランニングコストの上でも適用可能であることが示された。 また、温泉水の化学分析結果を基に磁気分離システムが低減すべきシリカ濃度の目標値を明確にした。	○ (達成)
⑭ 実用機設計、全体システム設計	10t/hの実用機設計とそれに付随する全体システム設計を行う	小容量のシステムであれば余剰の温泉水量が少ない温泉にも適用でき、本システムの適合地が多くなるため、⑫のシステムを元に、様々な容量に対応可能な小さいシステム（具体的には 10t/h のシステム）を複数台設置して 10t/h を 3 台設置し運用することとし、実用機設計を行った。	○ (達成)
⑮ ビジネスプランの検討	開発項目①、⑥、⑭の調査解析結果をもとに、ビジネスプランを検討する	シリカ含量が 200ppm 程度の場合にはランニングコストの上でも適用可能であることが示された。高濃度（500ppm）についてはさらなる最適化が必要となる。 また、文献の温泉の湧出温度と湧出量を参考に期待し得る温泉発電規模を想定した。	○ (達成)

IV. 実用化に向けての見通し及び取り組みについて

シリカの溶解度が低い場合であれば、採算性ある見込みが得られた。装置価格は800万円と本事業開始当初に製作予定していたが、性能と安定性を考慮すると初期投資として装置価格に2000万円ほど必要となってくるため、まだ現状では実用化に広がる状況までには至っていないと考える。

シリカ除去については、薬剤添加により、磁性を付与する必要がある、そのコスト低減が実用化に最重要となる。本事業では薬剤の連続投与での実施結果であり、シリカが配管や熱交換器に及ぼす経時変化を完全に解明できていない。本装置を間欠運転することで、薬剤軽減ができる一方、それに伴いどのようなスケール形成への影響があるかについても実用化の課題と考える。そのためには長期の現地試験なども実用化に向けて必要であると考え。現状では、本実験に適する実験サイトの確保（10ton/h以上の余剰水）が困難であり、実用化の途中にある。

本地熱水シリカ対策用磁気分離システムは本事業において、シリカスケールが析出するとされる様々な温泉水に対して磁気シーディング工程を行い、磁気分離可能なことが確認されている。よって、今後も多くの企業の協力や現地サイトの協力を仰ぎながら、装置やシステムの改善を行い、今後も装置や薬剤価格を下げる方法についての探索・検討を行う。

個別テーマ(2.8)

(2)低温域の地熱資源有効活用のための小型バイナリー発電システムの開発

※(4)「地熱発電の導入拡大に資する革新的技術開発」テーマ

(2.8) 電気分解を応用した地熱発電用スケール除去装置の研究開発

イノベティブ・デザイン&テクノロジー株式会社
国立大学法人静岡大学

II. 研究開発マネジメントについて(事業の計画内容)

(2.8.1)背景と目的

地熱利用の課題として、地熱水中成分の析出による配管や熱交換器へのスケール付着が挙げられる。特に、温泉水など低温域の地熱水を用いたバイナリーサイクル発電(温泉発電等)では、スケールによる配管閉塞や熱交換効率の低下が著しく、発電効率を低下させる主要因の一つとなっている。更に、条件によってはスケール除去に多大な費用を要し、発電システムの採算性を悪化させている。

そこで、本事業では電解水による空調機のスケール除去技術と実績を基に、当該技術を応用した低温域の地熱水もしくは蒸気に対応した電気分解(電解)スケール除去装置を開発する。

本装置の開発により、薬品を一切使用せず安価にスケール除去が可能となり、低温域の地熱発電の導入拡大へ資することを目的とする。

(2.8.2)研究開発の概要

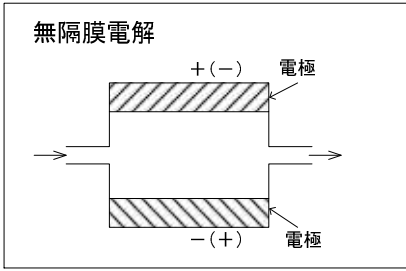
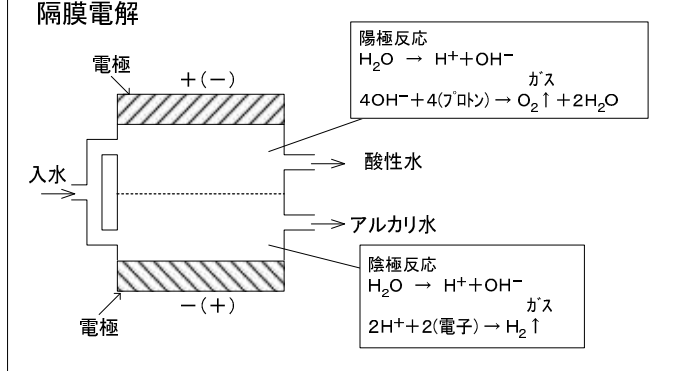
本事業では、泉質およびスケール成分が異なる複数個所において実証試験を実施し、スケール除去効果の確認を行う。また、地熱水の電解条件最適化など装置仕様について、伝熱理論及び物質移動理論を基にラボ実験と解析の両側面から基礎検討を行う。基礎検討結果と実証試験結果を相互に反映し改善することで、装置仕様を確立する。

電気分解を用いたスケール除去装置は、すでに工業用水等の冷却水系循環水への実績はあるが、地熱水への適用にあたっては表Ⅱ(2.8)-1の相違があり、これに対応した地熱発電用の電解スケール除去装置を開発する。また、電気分解には表Ⅱ(2.8)-2に示す2方式が有り、隔膜が無い方式(無隔膜式)と隔膜を用いた方式(有隔膜式)を平行して検討し、スケール除去性能と採算性を評価する。評価結果から平成28年度以降に開発予定の実スケール実証機の仕様を決定する。

表Ⅱ(2.8)-1 スケール除去装置の比較

項目	工業用水用スケール除去装置 (従来式)	地熱水用スケール除去装置
①水の流れ	冷却水を 循環で使用	ワンパス(循環しない)
②水質	不純物(ミネラル等)少	不純物(ミネラル、硫黄分等)多
③水温	5℃~50℃	90℃~150℃
④水圧	0.1MPa以下	0.48MPa以下(150℃飽和水蒸気圧)
⑤腐食性	腐食対策不要	腐食対策必要 (水中塩分、硫黄分等)

表 II (2.8)-2 電気分解装置の方式

項目	無隔膜式電解装置	有隔膜式電解装置
利点	隔膜が無い場合、製造コストが安価、メンテナンス性良	電解槽内部を陽極槽/陰極槽に分離できるため、電気分解水質を分離することが可能 (例：陽極槽⇒酸性溶液、陰極槽⇒アルカリ性溶液)
方式	 <p>無隔膜電解</p>	 <p>隔膜電解</p> <p>陽極反応 $H_2O \rightarrow H^+ + OH^-$ ガス $4OH^- + 4(アト) \rightarrow O_2 \uparrow + 2H_2O$</p> <p>酸性水</p> <p>アルカリ水</p> <p>陰極反応 $H_2O \rightarrow H^+ + OH^-$ ガス $2H^+ + 2(電子) \rightarrow H_2 \uparrow$</p>

本事業での研究内容は以下の通りである。

① 基本条件の調査研究開発

地熱水の電気分解によるスケール除去に必要な情報を明確にしたうえで、全国の地熱発電が可能な地域とその規模(湧出量)、水温、水質などの情報収集を行う。必要に応じて水質分析を行い、スケール付着程度、除去方法等について資料及び聞き取り等で情報収集を行う。また、地域により、泉質(スケール成分)、スケール付着の特色、地熱水の湧出(自噴泉か機械揚湯式か)の傾向等について調査する。

② 適正な電解条件の検討

電解電流と地熱水のスケール除去との関係をモデリングにより理論的に解明する。

理論モデル検討と並行して基礎実験および小型電解装置による流動実験を行い、数値モデルの妥当性評価を行う。また、スケール生成のメカニズムを電解前後のスケール成分分析や、電子顕微鏡での表面観察などにより検討すると共にスケール析出の温度依存性、泉質によるスケール生成の違い等も明らかにする。

この検討により、地下水基本条件(水温、水質、水量等)毎に最適な電解条件を明確化する。

③ 無隔膜電解装置の開発

無隔膜電解方式を用いたスケール除去装置を開発する。図 II (2.8)-1 にシステム構成例を示す。本システムは、電解スケール除去装置に取り込んだ地熱水の一部を電解処理し、バイナリー発電機側で合流させる方式である。電解槽スケール除去能力は電解処理の強さに関連するため、上記②の基礎検討結果を基に、取り込み水量と電流値を最適化する。同時に電解装置の耐熱、耐圧仕様を明確化する。また、装置内の電解槽に温泉水を引き込む方式以外に、温泉熱交換器自体に電解機能を内蔵したシステム(図 II (2.8)-2)等の実現性検討を行う。

装置の開発にあたり、下記の検討を重点的に実施する。

- ・地熱水はミネラル濃度が高く、電気分解により腐食性物質を生成するため、電極形状、電極配置や電解槽形状により、耐食性を向上させる。
 - ・バイナリー発電に適する地熱水温約 90~150℃、耐圧 0.5MPa 程度を目安に採算性も考慮した機器構造を検討する。また、実証試験を基に耐熱、耐圧仕様の見直しを行う。
- 実証実験を行うにあたっては、従来の電解基準仕様である取込み流量 10ℓ/min から開始し、取込流量と対象水量との最適条件を明確にする。対象地熱水量の目標 300ℓ/min で泉質の異なる 3 箇所の実験場所を確保し、スケールによる閉塞率を 6 ヶ月で約 30%削減すると共に、

スケール再付着の抑制効果を検証する。また、地熱水を電気分解することにより生成される酸化物質を6ヶ月で約30%削減する酸化物除去システムを確立する。

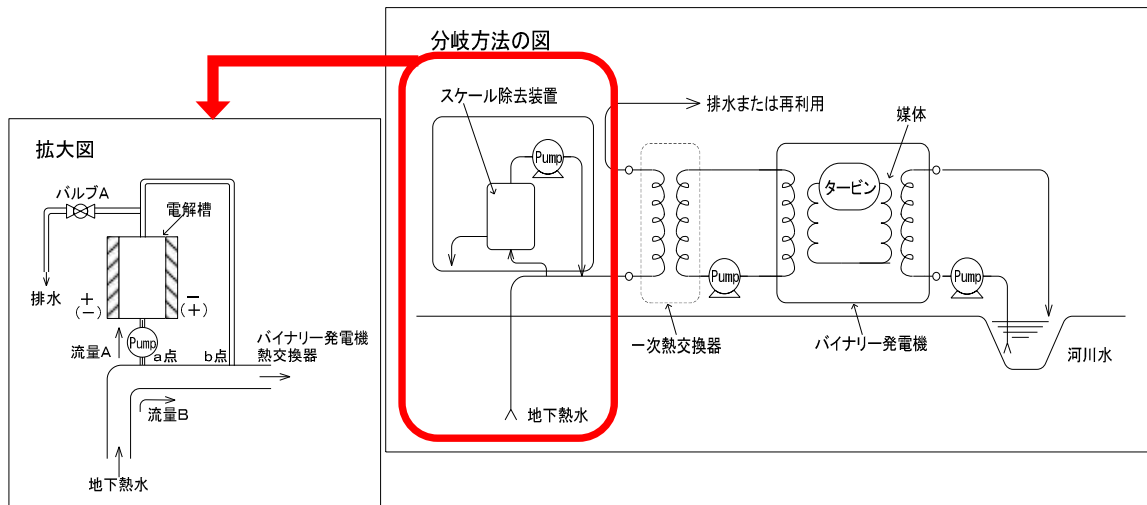


図 II (2.8)-1 無隔膜式電解装置システム構成(例)

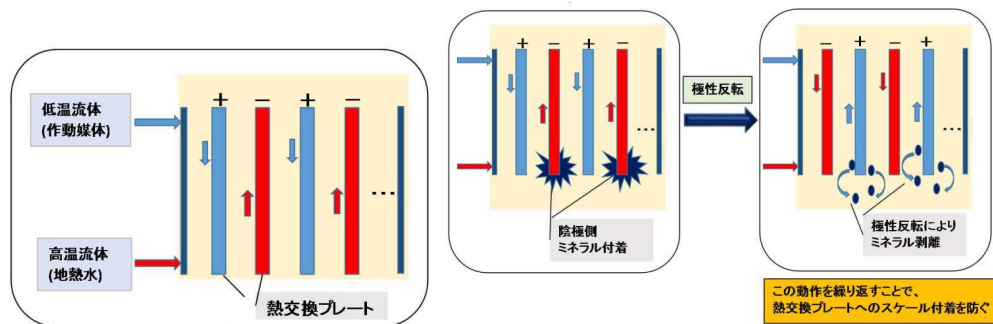


図 II (2.8)-2 電極内蔵型温泉熱交換器(例)

④ 無隔膜電解による生成物質の分析と腐食性物質の除去方法の開発

地熱水中の硫黄成分や塩素などから電気分解処理(特に陽極反応)で生成する酸化性物質の除去方法を検討する。小型試験用無隔膜電解スケール除去装置を用いた実験および温泉水とスケール成分の分析により、温泉水の電解で生成する腐食物質のデータ収集と予測を行う。

⑤ 有隔膜電解による洗浄装置の開発

無隔膜方式より有効性が高いと見込まれる有隔膜電解により生成した酸性電解水を使用したスケール析出抑制および除去システムの開発を行う。

有隔膜方式では直流電解を行った場合、電解槽内部の陽極槽と陰極槽で起こる電気化学反応を、隔膜により分離する事が可能である。また、スケール成分の炭酸カルシウムは、酸性で溶解度が上がるため、陽極槽で生成する酸性溶液によりスケール除去効果が高まる。ただし、酸性のままであると環境への影響や周辺部品の腐食等が発生するので、陰極槽で生成したアルカリ溶液で混合中和する方法を検討する。図 II (2.8)-3 にシステム構成例を示す。この方式では、洗浄のためにバイナリー発電機を停止する必要があり、洗浄時間の最小化についても検討する。

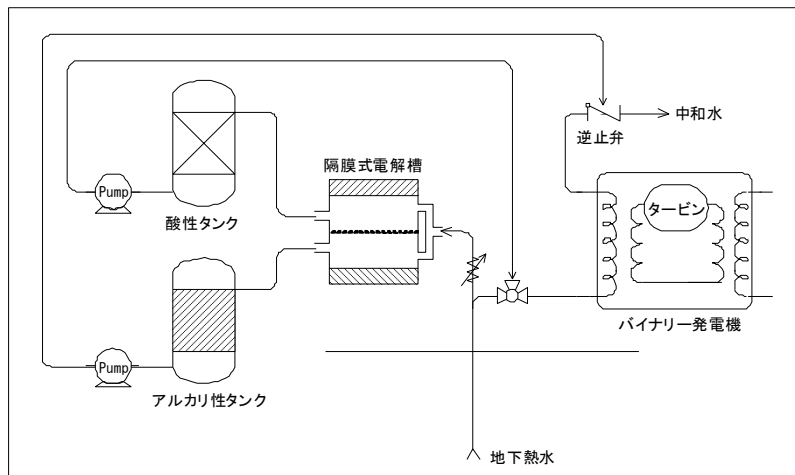


図 II (2.8)-3 有隔膜方式電解装置構成(例)

まず、酸性電解水の運用方法についてラボ実験および理論検討を行いシステム運用方法の目処付けを行う。この検討結果を元に実証試験用システムを製作し、バイナリー発電が見込める泉温90度以上の場所で実証試験を行う。

⑥ 有隔膜式電解装置によるスケール対策実証試験

上記⑤までの検討結果を踏まえ、スケール析出抑制および除去の有効性が確認できたシステムについて、数 kW の発電が見込める現場で熱交換器に対する実証試験評価を行う。この試験結果から、本開発システムのコスト試算を行い、既存スケール対策とのコスト比較を行う。

表 II (2.8)-3 研究開発目標と根拠

事業項目	開発目標	目標レベル設定の根拠
①基本条件の調査研究開発	日本全国の地熱発電が可能な地域の水温、水質、水量等基本条件を調査する。	日本全国を対象とすることで、本開発装置がターゲットとするスケール成分および泉質の絞り込みが可能となる。
②適正な電解条件の検討	水質の違いに対応した電解条件の明確化及び、スケール析出/溶解の温度依存性、電気分解と地熱水スケール除去との関係を明確化する。	実用化の観点から装置の適用範囲を広くすべく、水質の違いに対応した電解条件の解明を行う必要がある。
③無隔膜電解装置の開発	耐熱、耐圧仕様の試験用無隔膜電解装置を製作し、地熱水 90℃以上の複数箇所を実証試験を行い、システム性能とコストを見積もる。	小型バイナリーを想定して対象地熱水量を設定する。そのうえで、実用化の観点から装置の適用範囲を明確化する。
④無隔膜電解による生成物質の分析と腐食性物質の除去方法の開発	地熱水を電気分解することにより生成される酸化物質を6ヶ月で約30%削減する酸化物質除去システムを確立する。	電気分解により生成される酸化物質を削減することで、スケール除去対象機器に影響のないシステムの開発を行う。
⑤有隔膜電解による洗浄装置の開発	実証試験による有隔膜式電解装置のスケール除去または析出防止効果を確認した上で、20kW級温泉バイナリー発電機を想定した実用機相当の有隔膜電解装置の製作を行う。	実証試験による検証が可能な数kW~20kWまでを想定して開発を行うことにより、実用化に近い装置の開発を行う。
⑥有隔膜式電解装置によるスケール対策実証試験	熱交換器及びその周辺配管に付着するスケールの除去または付着抑制効果がある数kW~20kWまでの温泉バイナリー	実証試験による検証が可能な数kW~20kWまでを想定して開発を行うことにより、実

	発電機を想定した有隔膜式電解装置を開発し、既存スケール対策とのコスト優位性を実証する。	証評価と理論モデルの妥当性確認において精度が高い検証が可能となる。
--	---------------------------------------------	-----------------------------------

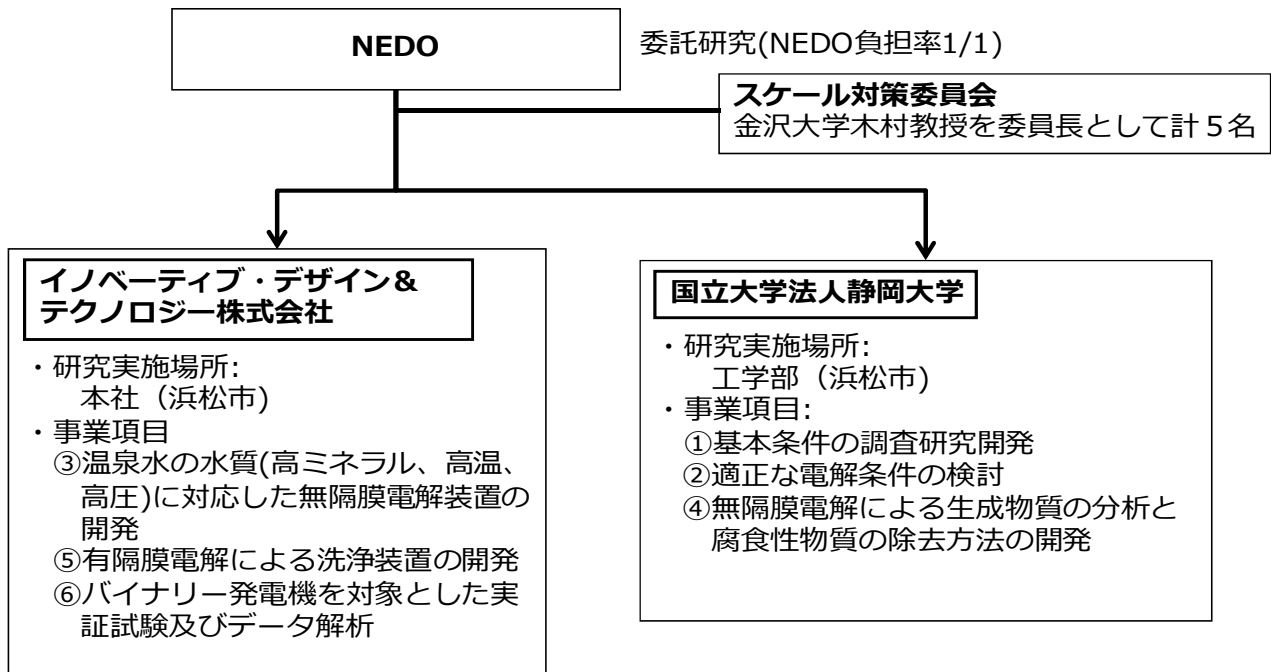
(2.8.3)事業スケジュール

事業項目	26年度				27年度				28年度				29年度			
	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q
①基本条件の調査研究開発			熱源の基本事項について調査 (文献調査・ヒアリング)						継続調査							
②適正な電解条件の検討		スケール主成分の特性調査・ラボ実験系準備			実験系による最適電解条件の検討											
		理論モデルの検討														
③無隔膜電解装置の開発		試作検証機①の設計/製作			実証試験											
					試作検証機②の設計/製作		実証試験・採算性評価									
④無隔膜電解による生成物質の分析と腐食性物質の除去方法の開発			物質の特定および分析													
			除去方法の検討・試作検証													
⑤有隔膜電解による洗浄装置の開発					ラボ試験				実証試験との整合性評価							
				試作検証機の設計/製作				実証試験・採算性評価								
⑥バイナリ発電機の熱交換器を対象とした実証試験及びデータ解析											実証試験およびデータ解析					

図Ⅱ(2.8)-4 研究開発のスケジュール

(2.8.4)研究開発の実施体制

事業実施体制図



(2.8.5)研究開発の運営管理

表Ⅱ(2.8)-4 電気分解を応用した地熱発電用スケール除去装置の研究開発 技術検討委員会
イノベティブ・デザイン&テクノロジー株式会社
国立大学法人静岡大学

担当	氏名 (敬称略)	所属
委員長	木村 繁男	金沢大学 環日本海域環境研究センター 機能機械工学科 教授
委員	花岡 孝吉	株式会社バイオドックス研究所 所長
委員	藤野 敏雄	株式会社エディット 代表取締役社長
委員	松島 良華	元 静岡大学 工学部 物質工学科 教授
委員	吉田 裕	吉田技術士事務所 所長

所属は、委員会組織時点のもの

Ⅲ. 研究開発成果について

泉質の異なる伊豆 2 地区での熱交換器に対する実証試験評価により、有隔膜電解装置で生成した電解酸性水を使用したシステムによりスケール析出抑制が可能であることが明らかとなった。

さらに、ラボ評価においては、スケール析出抑制数式モデルについて実用化に近い形まで検討が進んでおり、理論的側面からもシステムの有効性予測確認が可能となる見通しである。

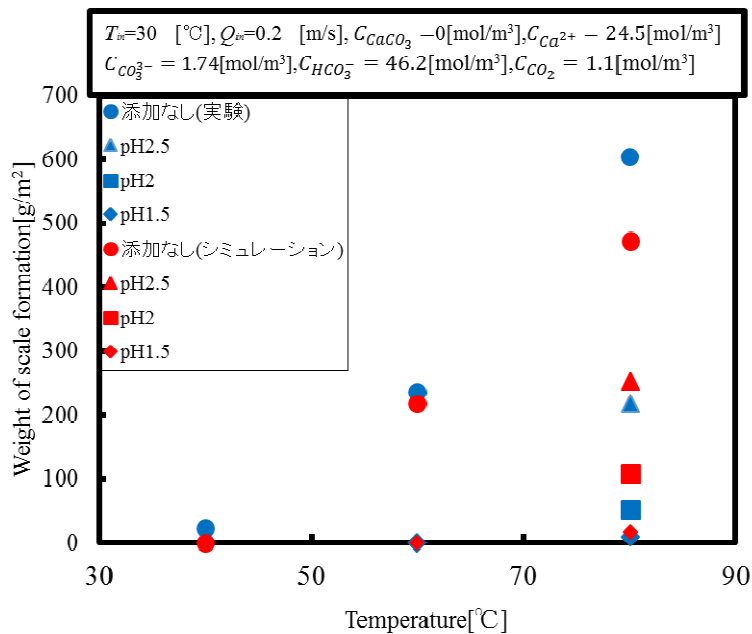
以下に成果を記す。

1. 基本条件の調査研究開発（研究項目①）

伊豆地区を中心に、温泉水およびスケール析出物を採取し成分分析を行なった。

この分析結果から得たイオン濃度情報をスケール抑制理論モデルに当てはめ、採取した源泉を用いたラボでのマイクロチャネル実験結果との照合を行った結果、理論モデルの妥当性が確認できた。

また、同時に行ったスケール対策方法・頻度についての聞き取り調査では、伊豆地区については主に炭酸カルシウムスケールが大量に析出しているが、地域によってスケール析出程度に差異が見られることが明らかとなった。また、主な対策方法としては薬剤添加によるスケール析出抑制と機械的な除去の両対策を行なっていた。



図Ⅱ(2.8)-5 . マイクロチャネル流動実験と数値シミュレーションの比較

2. 温泉水の水質に対応した無隔膜電解装置の開発（研究項目②③④）

スケールの析出/溶解過程を把握するため、マイクロチャネルを用いた基礎実験に着手した。第一段階として、熱川温泉で採取した温泉水をモデルとして設定した模擬温泉水を用いて加速実験を行なった。実験結果より、スケール析出量に影響を及ぼす主な因子は温度と pH であることが明らかになった。

実温泉水を用いた評価として、高温熱水に耐え得る電解槽の材質選定および構造検討を行なったうえで試作評価機（図Ⅱ(2.8)-6参照）を製作し、泉質およびスケール析出程度の異なる複数個所において実証試験によるスケール除去効果の検証を行った。その結果、泉温が低くスケール析出が緩やかな伊豆の国市では、当初付着しているスケールが 6 ヶ月で約 50%減少した（表図Ⅱ(2.8)-4参照）。また、装置の破損および制御異常も発生せず安定稼働が確認でき、スケール除去効果の有効性が確認できた。一方、スケール析出が激しい実証試験場所においてスケール付着抑制効果の検証を行ったところ、装置内部の配管でスケールによる閉塞が確認され電解装置の運転停止が確認

された。

この結果より、今回対象としている温泉水温が高くスケール析出が著しい場所への適応については、実用化に向けて解決すべき課題が大きいと判断し H27 年度で開発を終了した。



図 II (2.8)-6 無隔膜電解式評価装置 1 (電解水生成量が 70(l/min))

表 II (2.8)-5 配管閉塞率測定結果

閉塞率測定位置 1			
装置設置時測定	約 1 ヶ月後	約 3 ヶ月後	約 6 ヶ月後
 閉塞率=19%	 閉塞率=17%	 閉塞率=12%	 閉塞率=6%

閉塞率測定位置 2			
装置設置時測定	約 1 ヶ月後	約 3 ヶ月後	約 6 ヶ月後
 閉塞率=19%	 閉塞率=12%	 閉塞率=9%	 閉塞率=7%

3. 有隔膜電解による洗浄装置の開発およびバイナリー発電機を対象とした実証試験 (研究項目⑤⑥)

有隔膜電解から生成した酸性電解水によるスケール抑制/除去システムについて、ラボでの基礎実験データを基に泉質の異なる 2 箇所のサイト(伊豆地区)において実証試験を行なった。採算性が期待でき、発電システムへの影響が少ないシステムを検討した結果、[注入方式]、[循環洗浄方式]の 2 案が有効であると判断した。よって、この 2 システムを並行して評価を行った。

第一段階の評価として、SUS304、亜鉛メッキ鋼、チタンの 3 種類の配管材に対する評価を行なった。およそ 3 ヶ月間連続評価を行った結果、どちらのサイトにおいても同様のシステム運用条件で[注入方式]、[循環洗浄方式]共にスケール抑制効果が確認出来た。

この結果を踏まえ、小型プレート熱交換器に対する実証評価を行った上で、最終評価として小規模温泉バイナリーを想定した流量 130l/min、熱水温約 93 度の条件下で、約 1 カ月の連続評価を実施した。この結果、熱交換器に対しても配管材に対する結果と同様にスケール付着がほぼ 100%抑制できることが明らかとなった。さらに、実証試験結果より明らかとなったシステム運用条件からコスト試算を行い、既存スケール対策(薬剤+機械式)とのコストパフォーマンスの比較

を行った結果、本方式の優位性を示すことができた。

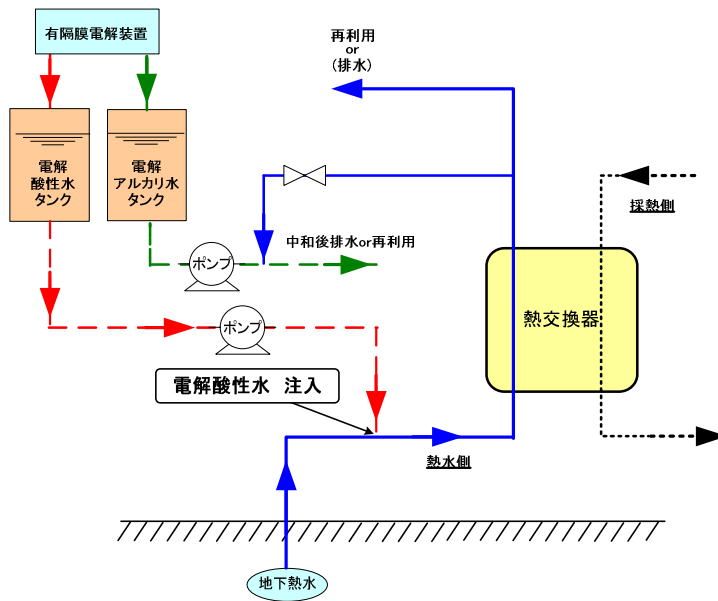


図 II (2.8)-7 システム設置案(インジェクション方式)

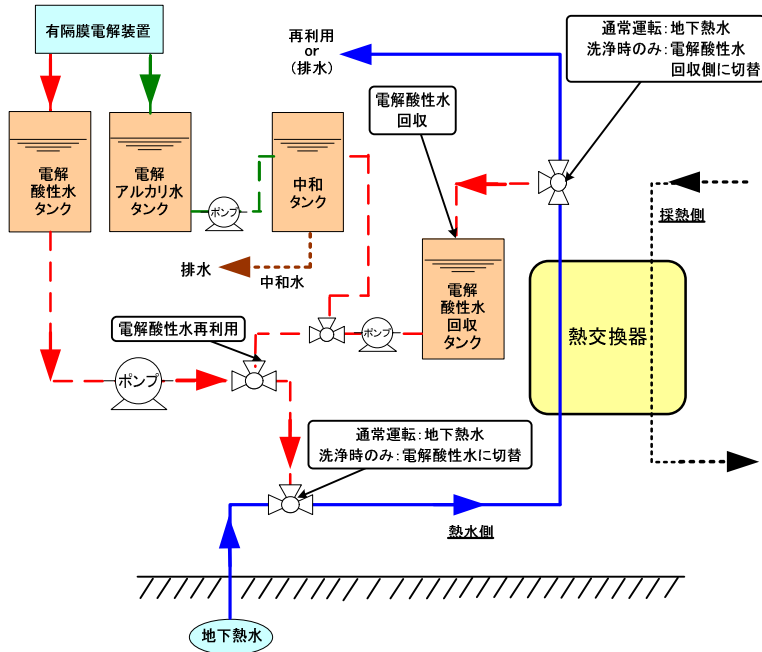


図 II (2.8)-8 システム設置案(循環洗浄方式)

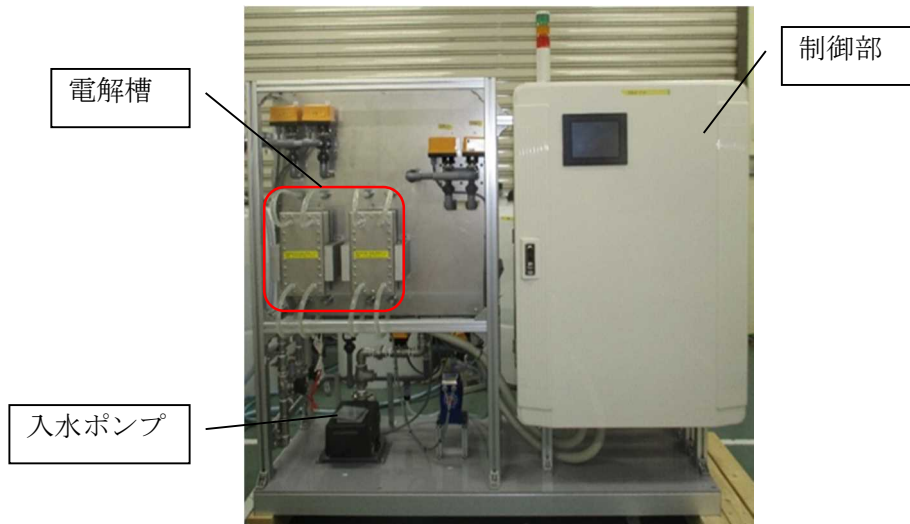


図 II (2.8)-9 実証試験用有隔膜電解装置

表 II (2.8)-6 源泉のみを流した場合のスケール付着状況

熱交換器高温側入水部	プレート全体

表 II (2.8)-7 熱交換器プレートの付着状況

インジェクション方式		循環洗浄方式	
源泉+ Na ₂ SO ₄ 酸性電解水	源泉+ 源泉酸性電解水	洗浄時酸性水 Na ₂ SO ₄ 酸性電解水	洗浄時酸性水 源泉酸性電解水
酸性電解水添加後 源泉 pH pH=7.0 添加時間設定 2分毎 1分間	酸性電解水添加後 源泉 pH pH=7.0 添加時間設定 2分毎 1分間	洗浄時間設定 90分毎 3分間	洗浄時間設定 90分毎 3分間
拡大部	拡大部	拡大部	拡大部

表Ⅱ(2.8)-8 熱交換器高温側入水部の付着状況

インジェクション方式		循環洗浄方式	
源泉＋ Na ₂ SO ₄ 酸性電解水	源泉＋ 源泉酸性電解水	洗浄時酸性水 Na ₂ SO ₄ 酸性電解水	洗浄時酸性水 源泉酸性電解水
酸性電解水添加後源泉 pH pH=7.0 添加時間設定 2分毎1分間	酸性電解水添加後源泉 pH pH=7.0 添加時間設定 2分毎1分間	洗浄時間設定 90分毎3分間	洗浄時間設定 90分毎3分間
			

表Ⅱ(2.8)-9 各運用方式における運転試算結果

方式/ (酸性電解水仕様)	インジェクション (Na ₂ SO ₄ 酸性電解水)	インジェクション (源泉酸性電解水)	循環洗浄 (Na ₂ SO ₄ 酸性電解水)	循環洗浄 (源泉酸性電解水)
運転条件	注入間隔2分毎/1分間 注入量 4.9ℓ/min	注入間隔2分毎/1分間 注入量 6.2ℓ/min	洗浄間隔90分毎3分間 酸性水使用量 80ℓ/min 酸性水入替時間 1日毎	洗浄間隔5時間毎1分間 酸性水使用量 80ℓ/min 酸性水入替時間 1日毎
有隔膜電解装置 生成能力	10ℓ/min	10ℓ/min	2ℓ/min	2ℓ/min
Na ₂ SO ₄ 試薬費 (単価 270円/kg)	890,053	0	12,960	0
電気料金 (20円/kwh)	16,679	15,699	728	728
水道料金 (100円/ton)	49,447	0	720	0
合計(円/月)	956,179	15,699	14,408	728
装置消耗品費 (年)	60,000	1,200,000	200,000	400,000
総額(円/年間)	11,534,148	1,388,388	372,896	408,736

※条件：温度約97(℃)、毎分160(ℓ)、定格出力3kWの温泉バイナリ発電での比較

※ヒアリング調査した既存スケール対策(薬剤+機械式)費用：総額年間144万円

表Ⅲ(2.8)-10 特許、論文、外部発表等

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表		
	国内	外国	PCT※ 出願	査読 付き	その 他	学会発表・ 講演	新聞・雑誌等 への掲載	その他
H26FY	1件	0件	0件	0件	0件	0件	0件	0件
H27FY	1件	0件	0件	0件	0件	0件	0件	0件
H28FY	1件	0件	0件	0件	0件	0件	0件	0件
H29FY	1件	0件	0件	0件	0件	0件	0件	0件

(※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約)

[最終目標に対する成果と達成度]

表Ⅲ(2.8)-11 最終目標に対する成果と達成度

開発項目	開発目標	成果	達成見込み
①基本条件の調査研究開発	電解スケール除去に必要な情報を調査するとともに、スケール除去の数式モデル妥当性を全国複数箇所で見積りする。	伊豆地区を中心に、温泉水およびスケール析出物を採取し成分分析を行なった。この分析結果から得たイオン濃度情報をスケール抑制理論モデルに当てはめ、採取した源泉を用いたラボでのマイクロチャンネル実験結果との照合を行った結果、理論モデルの妥当性が確認できた。これによりスケール抑制予測が可能となった。	○
②適正な電解条件の検討	小型無隔膜電解装置を用いたラボ実験およびスケール除去実績データから理論モデルを作成し、電気分解による地熱水スケール除去のための電解条件を明確にする。	ラボでの基礎実験により、無隔膜電解で生成した電解水でスケール除去できる要因は、イオン輸送に依る可能性が高いことが明らかとなった。同時に、マイクロチャンネルを用いたラボ実験を行ない、スケール析出および抑制過程を把握することで、実証試験における、電解条件の目処付けを行なった。	○
③温泉水の水質に対応した無隔膜電解装置の開発	耐熱、耐圧仕様の試験用無隔膜電解装置を製作し、地熱水 90℃以上の複数箇所で見積りを行い、システム性能とコストを見積もる。	伊豆地区内複数箇所で見積り、炭酸カルシウムスケールに対するスケール除去実証評価を行った。泉温が低くスケール析出が穏やかなサイトにおいては、当初付着している配管スケールを6ヶ月間で約50%削減した。しかし、スケール析出が著しいサイトにおいては、スケール除去効果は得られたが、電解装置内部へのスケール付着による閉塞が確認された。実用化を考慮した場合、装置が大型となり採算面からも実用化が難しいと判断し、H27年度で開発を終了した。	△
④無隔膜電解による生成物質の分析と腐食性物質の除去方法の開発	地熱水の電気分解により生成される酸化物質を約30%削減可能なシステムを明確にする。	基礎実験により、地熱水中に含まれるイオンから生成する酸化性物質を特定し、除去方法について検討を行った。	○
⑤有隔膜電解による洗浄装置の開発	実証試験による有隔膜式電解装置のスケール除去または析出防止効果を確認した上で、20kW級温泉バイナリー発電機を想定した実用機相当の有隔膜電解装置の製作を行う。	基礎実験により、スケール析出抑制に有効である酸性電解水の仕様、および酸性電解水の運用条件の目処付けを行った。その結果をもとに、実証試験用の有隔膜装置電解装置を製作した。また、スケール析出抑制システムとして有効と思われる[注入方式]、[循環洗浄方式]の2つの設置案を提案した。	○

<p>⑥バイナリー発電機の熱交換器を対象とした実証試験及びデータ解析</p>	<p>熱交換器及びその周辺配管に付着するスケールの除去または付着抑制効果がある数kW~20kWまでの温泉バイナリー発電機を想定した有隔膜式電解装置を開発し、既存スケール対策とのコスト優位性を実証する。</p>	<p>周辺配管および熱交換器への付着抑制効果については、小流量における評価および流量を増量した場合両評価においてスケール付着抑制効果があることが実証出来た。 また、既存スケール対策(薬剤+機械式)に対するコスト優位性についても、20kW程度までの発電に必要な湯量に対するシステム運用条件で試算した結果、コスト優位性が実証出来た。</p>	<p>○</p>
----------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------

IV. 実用化に向けての見通し及び取り組みについて

本技術は薬剤を一切使用せずスケール除去・付着防止が可能である。このため、地熱水の有効利用(発電後の温泉施設等での再利用)、および環境負荷の点を考えると広く受け入れられやすい技術であり、普及が期待できる。実証試験の結果、工業用循環水向けスケール除去装置と同方式の試験機で、地熱水および地熱スケールに対して電解水によるスケール除去が有効であるという見通しがついた。

加えて、スケール除去・付着抑制が期待できる有隔膜式スケール除去試験装置を製作し実証試験を行った。その結果、有隔膜式スケール除去装置でもスケール付着抑制効果があることが実証出来た。さらに、ラボ評価においては、スケール析出抑制数式モデルについて実用化に近い形まで検討が進んでおり、理論的側面からもシステムの有効性予測確認が可能となる見通しである。

今後実用化に向け、下記の開発を進める予定である。

- ・有隔膜電解装置及び周辺システムの改良を行い、量産機の製作を行う。
- ・実用化におけるコスト試算の詳細検討を行い、目標コストを明確にした上で、有隔膜式電解装置およびシステム全体のコストダウン検討を行う。
- ・ラボ評価（水質分析から電解水仕様およびシステム運用条件の目処付け）から簡易実地評価（簡易診断モデルによる短期実地試験）を行うことが可能な簡易評価システムの運用によるシステム有効性予測に必要なデータベースの構築を行う。
- ・スケール抑制数式モデルを現場に近い条件に対応した形に応用し、最終的に、システム導入の際に効果の事前予測が可能となるプログラムの完成を目指す。

また、本事業で得られた成果を基に、H30年度より経済産業省のサポイン事業(戦略的基盤技術高度化支援事業)で工業分野(製造現場)におけるスケール対策技術として開発を行う計画である。

本事業の地熱発電とは分野が、ベース技術は同じであるためサポイン事業で引き続き開発を進めることで、システムの実用化をスピードアップできると考えている。また、市場が大きい工業分野で実用化を進めることで、システムの安定性評価を行うことができ、より完成度の高いシステムの完成が期待できる見通しである。

個別テーマ (2.9)

(2) 低温域の地熱資源有効活用のための小型バイナリー発電システムの開発

※ 「(4) 地熱発電の導入拡大に資する革新的技術開発」テーマ

(2.9) 温泉熱利用発電のためのスケール対策物理処理技術の研究開発

委託先：国立大学法人東北大学、東北特殊鋼株式会社、株式会社テクノラボ

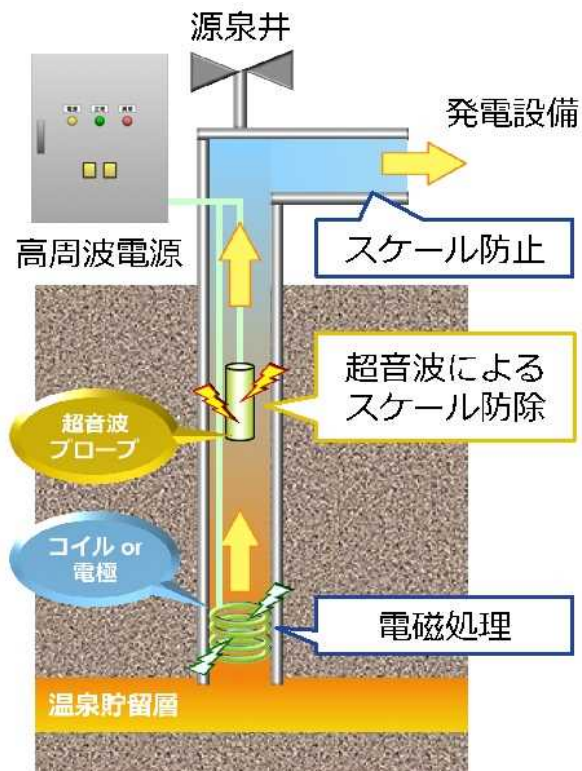
II. 研究開発マネジメントについて(事業の計画内容)

(2.9.1) 背景と目的

2011 年の東日本大震災以降、再生可能エネルギー導入拡大が望まれる中、世界第 3 位となる地熱資源を有する我が国では、ベース電源として活用可能な地熱発電が大きな注目を集めている。本事業の目的は、地熱開発を促進する取り組みとして革新的なスケール対策技術開発を行い、地熱発電の導入拡大を図ることである。

一般に、源泉水中に無機塩類を多量に含む温泉水の利用においては、配管内壁や熱交換器表面等への温泉水成分に起因するスケール付着の問題が、その利用拡大の最大の障害となる。既存のバイナリー発電ユニットを利用した温泉熱利用発電においても、温泉水を一次側の熱源として利用するには、スケール付着による伝熱交換効率の低下や、閉塞による操業率低下を避けることは困難であり、例えば、発電用の蒸気を発生させる熱媒体の加熱には、浄水等を間接的に熱源として用いる等の工夫を施している。それでも浄水を加熱するための熱交換機、及びそこに到る源泉からの配管系統では、温泉水成分に起因するスケールの析出と成長による閉塞の問題が発電システムの安定運用を妨げているのが実状であり、商業的発電システム普及の最大の障害となっているのである。このことは、言い換えればスケール発生が予測される温泉を利用する場合、経済的に見合うスケール対策技術が確立されない限り商業的発電は不可能であることを示しており、既存の温泉や地下からの熱水を利用しようとする地熱開発において、有効性と経済性を満たす革新的なスケール対策技術の確立は、解決しなければならない喫緊の課題である。

そこで本事業では、非接触で、連続的、且つ低コストで運用できる革新的スケール対策技術として「超音波処理」及び「高周波電磁処理」の物理処理技術の研究開発を行い、地熱発電運用コストの大幅低減を図ることを最終目的とする。



図V (2.9)-1 超音波及び電磁処理によるスケール対策

(2.9.2)研究開発の概要

本事業では、連続的、且つ低コストで使用できる革新的スケール対策技術として「超音波処理」及び「高周波電磁処理」の物理処理技術を適用することで、装置の設置箇所の下流側(配管及び熱交換器)におけるスケール形成を抑制または防止できる革新的なスケール防止技術を開発し、地熱発電運用コストの大幅低減を目指す。

基礎的実験から、超音波処理、高周波電磁処理及びその複合挙動によるスケール防止効果を確認し、これらのメカニズム解明と最適条件の究明を行う。また、温泉地の現地調査から水質分析等を行ってデータベースを構築し、合わせて実証試験方法を確立する。これらの知見から、超音波及び高周波電磁場発生用の共用高周波電源、源泉坑井管内でも運用できる超音波プローブ及び電磁場コイルを製作し、超音波及び高周波電磁処理のハイブリッドスケール防止装置を開発する。また、その実証試験及び水質データベースから、同ハイブリッドスケール防止装置の運用条件を、無機塩類を多量に含む多様な温泉水に対して体系化する。

- ① 超音波及び高周波電磁処理によるスケール防止効果の確認
- ② 超音波及び高周波電磁処理のハイブリッドスケール防止装置の開発
- ③ ハイブリッドスケール防止装置の実証試験とその運用条件の体系化

☞ スケール対策の年間運用コストを、従来の浚渫もしくは薬注による対策コストと比較し20%以上低減する。

☞ 多様な温泉水に対するデータベースを構築し、ハイブリッドスケール防止装置の運用条件を体系化する。

表V(2.9)-1 研究開発目標と根拠

事業項目	開発目標	目標レベル設定の根拠
① 超音波及び高周波電磁処理によるスケール防止効果の確認	<ul style="list-style-type: none"> ➢ スケール付着防止効果の理論化確立 ➢ 国内累計15～20ヶ所程度の温泉地の現地調査並びに水質分析 	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 本技術に係る一定の統一見解の必要性 ➢ 2ヶ月に1ヶ所程度の現地調査及び水質分析を目安に設定
② 超音波及び高周波電磁処理のハイブリッドスケール防止装置の開発	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 100A配管に適用し得る、出力:300W以上の高周波電源を開発(H27年度まで) ➢ 150℃の源泉坑井管内でも運用可能な発振部を開発(H27年度まで) ➢ ハイブリッドスケール防止装置の製品仕様を確定 	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 温泉で頻繁に使用される65～75A配管をカバーでき、利用できる市販電源部品の上限程度を目安に設定 ➢ テフロン耐熱温度(200℃程度)をもとに安全を考慮して設定 ➢ 事業化を前提に設定
③ ハイブリッドスケール防止装置の実証試験とその運用条件の体系化	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 2か所以上で4～6セット程度の実証試験 ➢ 実証試験によってスケール防止効果を確認し、運用条件を体系化 ➢ 導入データ及び現地調査データ(累計500件程度)をデータベース化 	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 2ヶ月に一度程度の現地調査及び分析を目安に設定 ➢ 事業化目指し設定 ➢ 導入データを千件弱程度保有していると予想されたことから設定
④データ統合解析	<ul style="list-style-type: none"> ➢ スケール防止効果の総合評価 	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 実用化・事業化を前提に設定
最終目標	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 本研究の試験フィールドにおいて、スケール対策の年間運用コストを、従来の浚渫もしくは薬注による対策コストと比較し20%以上低減する ➢ 多様な温泉水に対するデータベースを構築し、ハイブリッドスケール防止装置の運用条件を体系化する。 	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 装置導入コストを3年以内に回収できることを目標に設定 ➢ 実用化・事業化を前提に設定

(2.9.3)事業スケジュール

本事業の研究期間は、平成26年10月1日より平成29年2月28日であり、主な事業スケジュールの概要を図V(2.9)-2に示す。

事業項目	H26				H27				H28				H29			
	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q
① スケール防止効果確認																
スケール挙動及び処理効果確認																
現地調査																
水質分析及び適合試験																
② スケール防止装置開発																
設計・製作																
装置改良																
③ 実証試験と運用条件体系化																
実証試験準備																
データベース作成																
実証試験																
運用条件体系化																
④ データ統合解析																

図V(2.9)-2 研究開発のスケジュール

(2.9.4) 研究開発の実施体制

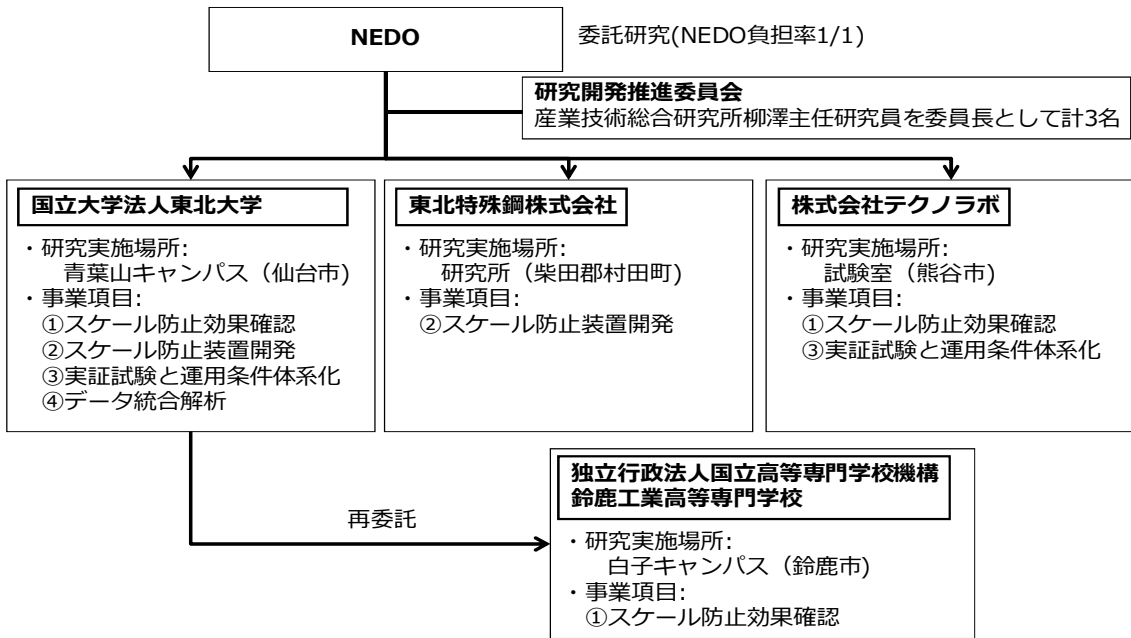


図 V (2.9)-3 研究開発の実施体制

(2.9.5) 事業の管理運営

表 V 2.9-2 温泉熱利用発電のためのスケール対策物理処理技術の研究開発
技術検討委員会

担当	氏名 (敬称略)	所属
委員長	柳澤 教雄	産業技術総合研究所 主任研究員
副委員長	村松 淳司	東北大学多元物質科学研究所 教授
委員	木下 睦	東北大学大学院環境科学研究科 准教授

Ⅲ. 研究開発成果について

本事業では、地熱発電運用コストの大幅低減を図ることを目的に、連続的、且つ低コストで運用できる革新的スケール対策技術として“超音波処理”及び“高周波電磁処理”の物理処理技術の研究開発を行った。

- ① 基礎的実験から、適切な周波数の電磁処理と、低周波数域の音響による実験系の力学的共振現象を活用した超音波処理、及びこれらの複合利用の有効性を確認した。また、フィールドでスケール付着状況を短時間で定量的に把握するため、水晶振動子マイクロバランスを用いた秤量方法を開発し、実証試験フィールドにおいて、その有効性を示した。スケール形成過程におけるバイオフィームの影響を提示し、これをフィールドで簡便に確認できるクリスタルバイオレット染色法によるバイオフィーム評価法を開発した。
- ② 基礎的実験から得た知見を基に、低周波数域（周波数: 1Hz～1kHz）の超音波及び高周波電磁場（1kHz～200kHz）発生用の電源、源泉坑井管内でも運用できる超音波発振部及び電磁場発振部を開発した。温泉地の現地調査等からデータベースを構築し、開発したハイブリッドスケール防止装置の実証試験を行って、同装置の運用条件を、無機塩類を多量に含む多様な温泉水に対して体系化した。
- ③ 本事業で実施した実証試験においては、スケール対策の年間費用を、現状の薬注処理等と比較し約 90%低減できること、装置導入に係るイニシャルコストも 1 年以内に償却できることを確認した。
- ④ 本事業により、ハイブリッドスケール防止装置の適用条件を明らかにし、同装置の導入フロー、並びに管理・検査法を確立した。更に、ハイブリッドスケール防止装置の製品仕様を確定させた。

39日間使用した試験配管を比較

未処理：H29.5.24～7.2

電磁及びハイブリッド処理：H29.9.19～10.28



未処理

スケール付着質量（乾燥）：2.16 kg/m/39日間
 スケールかさ密度（乾燥）：1.23 g/cm³
 配管断面積残存率：17%



電磁処理

スケール付着質量（乾燥）：1.99 kg/m/39日間
 スケールかさ密度（乾燥）：1.45 g/cm³
 配管断面積残存率：35%



ハイブリッド処理

スケール付着質量（乾燥）：0.93 kg/m/39日間
 スケールかさ密度（乾燥）：1.09 g/cm³
 配管断面積残存率：60%

図V(2.9)-4 各試験配管に対するスケール付着状況

表V(2.9)-3 特許、論文、外部発表等

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表		
	国内	外国	PCT※ 出願	査読 付き	その 他	学会発 表・講演	新聞・雑誌 等への掲載	その他
H26FY	0件	0件	0件	1件	0件	4件	0件	0件
H27FY	0件	0件	0件	6件	0件	2件	0件	0件
H28FY	1件	0件	0件	3件	0件	7件	0件	0件
H29FY	1件	0件	0件	2件	0件	0件	0件	0件

(※Patent Cooperation Treaty：特許協力条約)

[最終目標に対する成果と達成度]

表V (2.9)-4 最終目標に対する成果と達成度

事業項目	開発目標	成果	達成度
① 超音波及び高周波電磁処理によるスケール防止効果の確認	<ul style="list-style-type: none"> ▶ スケール付着防止効果の理論化確立 ▶ 国内累計15～20ヶ所程度の温泉地の現地調査並びに水質分析 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 実証試験等データよりスケール付着防止効果と電磁場及び超音波処理の適用範囲を推察した。 ▶ 累計33ヶ所の試験を実施した。 	▶ ○
② 超音波及び高周波電磁処理のハイブリッドスケール防止装置の開発	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 100A配管に適用し得る、出力:300W以上の高周波電源を開発 (H27年度まで) ▶ 150℃の源泉坑井管内でも運用可能な発振部を開発 (H27年度まで) ▶ ハイブリッドスケール防止装置の製品仕様を確定 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 出力300WのLC共振回路付電源を開発した。 ▶ 源泉坑井管内に適用できる電磁場発振部及び超音波発振部を開発し、耐熱試験を実施した。 ▶ 製品仕様確定 高温対応の実現化できた。 	▶ ○
③ ハイブリッドスケール防止装置の実証試験とその運用条件の体系化	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 2か所以上で4～6セット程度の実証試験 ▶ 実証試験によってスケール防止効果を確認し、運用条件を体系化 ▶ 導入データ及び現地調査データ (累計500件程度) をデータベース化 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 累計33ヶ所の現地調査を実施した。 ▶ 実証試験 (3ヶ所) を実施し運用条件を体系化した。 ▶ 累計650件のデータベースを構築した。 	▶ ○
④データ統合解析	<ul style="list-style-type: none"> ▶ スケール防止効果の総合評価 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 総合評価を実施し、ハイブリッドスケール防止装置の運用条件を構築した。 	▶ ○
最終目標	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 本研究の試験フィールドにおいて、スケール対策の年間運用コストを、従来の浚渫もしくは薬注による対策コストと比較し20%以上低減する ▶ 多様な温泉水に対するデータベースを構築し、ハイブリッドスケール防止装置の運用条件を体系化する。 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 清里で実施した実証試験の結果、現状の薬注による対策コストと比較して20%以上低減できることを確認した。 ▶ データベースを構築し、温泉水に対するハイブリッドスケール防止装置の適用範囲を明らかにし、運用条件を体系化した。 	▶ ○

IV. 事業化へ向けての見通しと取組みについて

(1) ハイブリッドスケール防止装置導入の経済性評価

今回開発されたハイブリッドスケール防止装置導入による経済性評価を実施した。その結果を表V(2.9)-5に示す。その概要を以下に示す。

- ① 実証試験対象になった清里温泉でのスケール防止薬剤、スケール清掃費用及びそれに伴う営業損失の合計は、年間約13百万円と想定された。
- ② スケール対策設備として、高周波電源では、電磁処理部(100W)及び超音波処理部(50W×2台)、振動スピーカでは、最大50W×3台の設備仕様とした。
- ③ その他、ランニング費用として、定期検査や清掃費用、消耗品交換費用を考慮し、年間約1.3百万円を計上した。
- ④ その結果、初期導入費では、焼却年数を1年未満に抑えるとともに、年間維持費についても従来の約90%削減するとの試算となった。

表V(2.9)-5 清里温泉における経済性評価結果

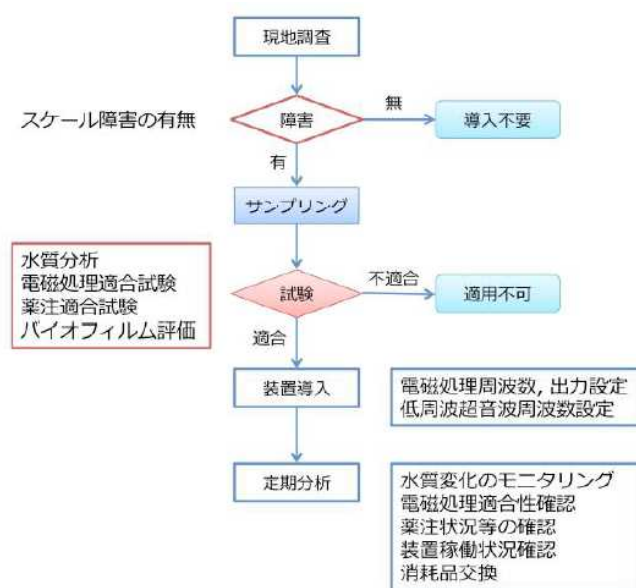
費用項目		現状	NEDO 開発技術
ランニングコスト	清掃・維持費	¥3,000,000	¥1,000,000
	薬品費	¥4,000,000	¥0
	営業損失	¥6,000,000	¥0
	電力費	¥0	¥10,000
	機器保守管理費	¥0	¥300,000
年間ランニングコスト合計		¥13,000,000	¥1,310,000
ランニングコスト削減比		89.9%	
イニシャルコスト	ハイブリッドスケール防止装置		¥8,000,000
	超音波発振部		¥300,000
	設置工事費		¥400,000
イニシャルコスト合計			¥8,700,000
償却年数		0.7年	

(2) ハイブリッドスケール防止装置導入の仕方

同装置導入にあたる留意事項を以下に示す。

- 本装置の水質適合範囲は以下のとおりである。
 - ◇ 全硬度は 1,000mg/L 程度以下とする。
 - ◇ 溶解性シリカは、140mg/L 程度を大きく超過する場合には、適合範囲外とする。
- 高温高压の地下状態から大気解放される場合、噴出後、各成分が変化しスケール析出を生じやすいので、現地で各種試験を実施する必要がある。
- 変動している温泉については、導入後、定期的に試験確認を行う必要がある。

以上、同装置の導入フロー図を、図V(2.9)-5 に示す。



図V(2.9)-5 ハイブリッドスケール装置導入フロー図

個別テーマ (2.10)

(2) 低温域の地熱資源有効活用のための小型バイナリー発電システムの開発

※「(4) 地熱発電の導入拡大に資する革新的技術開発」テーマ

(2.10) バイナリー式温泉発電所を対象としたメカニカルデスケーリング法の研究開発

委託先：国立大学法人秋田大学、株式会社管通、
国立大学法人東北大学、国立大学法人東京海洋大学

II. 研究開発マネジメントについて(事業の計画内容)

(2.10.1) 背景と目的

再生可能エネルギー導入拡大が望まれる中、世界第3位となる地熱資源を有する我が国では、ベース電源として活用可能な地熱発電が大きな注目を集めている。地熱開発の中で低温域の地熱資源を活用する温泉バイナリー発電システムは、全国各地に分布する温泉熱エネルギーを発電に利用するため地域分散型の電源として活用でき、地域経済の活性化に対する貢献が期待されている。

しかしながら、実証試験が進むにつれて、配管に付着する温泉スケールが普及に向けた大きな阻害要因であることが判明してきた。

本事業は、配管に付着した温泉スケールを機械的に効率良く洗浄するメカニカルデスケーリング法を開発することを目的として、秋田大学、(株)管通、東北大学、東京海洋大学による大学と民間企業の連携による研究体制のもと、温泉熱バイナリーの普及を阻んでいるスケール問題の解決に貢献することを目的とした研究開発を実施する。

(2.10.2) 研究開発の概要

本事業では以下の研究開発を実施する。1年目(平成26年度)はスケール・温泉水の分析、モニタリング装置開発のための基礎データ収集、スケール除去装置の小規模な試作品開発を行い、2年目(平成27年度)に高圧ウォータージェットポンプを含む大規模な実験装置の開発、モニタリング法およびスケール除去装置を開発する。

3年目(平成28年度)は現場実験を行い開発した装置の性能を検証する。最終年度(平成29年度)には、装置の改良および実用化に向けての課題抽出を行う。

研究開発の概要は以下の通りである。各事業項目における研究開発目標と根拠を表V(2.10)-1に示す。

① 経済性及び実用化後の波及効果の評価

新手法の経済性及び実用化後の波及効果について、従来法および新手法における費用、清掃頻度を検討の上、将来的に発電継続が可能になることを踏まえた経済的導入可能性を評価する。

②スケール構造・組成とスケール強度との関係についての検討解析

現場よりスケール試料を収集し、得られたスケール試料の結晶構造解析、顕微鏡観察、化学組成分析を実施する。また、スケールの引張試験等の強度試験を実施し、これらを総合してスケール構造および組成とスケール強度との関係についての研究を行いこれらの関係について検討解析する。

③スケール付着計測技術及び装置の開発ならびにスケール除去時期判断手法の開発

温泉での配管温度計測を行い、スケール付着量と熱伝達率との関係を明らかにすると共に、スケール除去作業前後のスケール付着状況を計測可能な装置を開発する。開発した計測装置について現場における性能確認試験を行う。併せて、外部から非破壊で測定したスケール付着状況からスケール除去の実施時期を判断する手法を開発する。

④スケール除去装置の開発及び評価手法の開発

経済性及び実用化後の波及効果の評価において、経済的導入可能性に見込みがあると判断された場合、スケール除去装置の要素技術開発・スケール除去実験を行うための実験装置を開発するとともに、ウォータージェットおよびピグを用いたデスケーリング装置を開発する。実験装置を用いてスケール除去実験を行うとともに数値シミュレーションを行い、スケール除去能および切削屑の排出挙動に関する実験的評価手法を開発する。

⑤スケール除去装置の現場性能確認実験

開発したデスケーリング装置を用いての現場性能確認実験を行い、スケール除去作業時間および作業費用を明らかにする。デスケーリング装置の性能向上に関する課題抽出を行うとともに対策を施す。

表V (2.10)-1 研究開発目標と根拠

事業項目	開発目標	目標レベル設定の根拠
①経済性及び実用化後の波及効果の評価	従来法および新手法における費用、清掃頻度を検討の上、将来的に発電継続が可能になることを踏まえた経済的導入可能性を評価し提示する。	新手法開発によるユーザーのコストメリットを明らかにするため、従来法及び新手法による導入・運用コストの経済性を比較検討することを目標に設定した。

②スケール構造・組成とスケール強度との関係についての検討解析	スケール及び温泉水の分析ならびにスケールの力学試験結果を基に、鉱物学・結晶学的見地からデスケーリング装置の設計指針を提案する。	デスケーリング装置開発を目的としたスケール構造・組成とスケール強度との関係についての検討解析を行い、デスケーリング装置の設計指針を提案することに目標を設定した。
③スケール付着計測技術及び装置の開発ならびにスケール除去時期判断手法の開発	スケール付着状況とスケール除去の効果を非破壊で外部から判断可能な温度測定式モニタリング装置を開発する。	現状では、温泉水の供給が減少するとデスケーリング工事が行われている。デスケーリングの実施時期を非破壊で外部から判断するために目標を設定した。
④スケール除去装置の開発及び評価手法の開発	平成27年度までに常温で稼働可能なデスケーリング実験装置を開発する。平成29年度までに源泉を止めずに使用できるデスケーリング技術を開発する。	源泉を止めずに使用できるデスケーリング技術を開発することを目的として、平成27年度までに常温で稼働可能な装置開発を目標に設定した。また、平成29年度までに源泉を止めずに使用できるデスケーリング技術を開発することを目標に設定した。
⑤スケール除去装置の現場性能確認実験	設備利用率の向上を加味して従来法より年間の運用コストが20%以上低減できるスケール除去法を開発する。	温泉バイナリー発電の導入拡大に資する革新的技術開発を行うことを目的として、年間運用コストを20%以上低減することを目標に設定した。

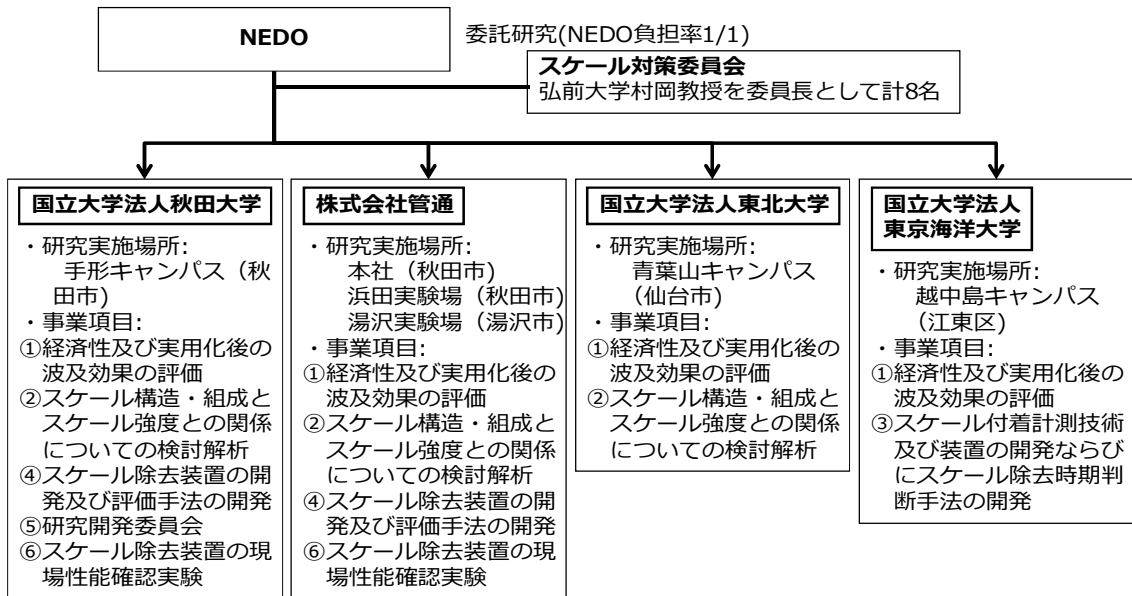
(2.10.3)事業スケジュール

本事業の研究期間は、平成26年8月8日より平成29年2月28日であり、主な事業スケジュールの概要を図V(2.10)-1に示す。

研究開発項目	26年度				27年度				28年度				29年度			
	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q
①経済性及び実用化後の波及効果の評価			→													
②スケール化学組成・構造とスケール発生・成長・強度との関係の検討		→	→	→			→	→					→	→	→	→
③スケール付着計測技術及び装置の開発ならびにスケール除去時期判断手法の開発			→	→	→	→	→	→	→	→	→	→				
④スケール除去装置の開発及び評価手法の開発			→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→	→
⑤スケール除去装置の現場性能確認実験										→	→	→	→	→	→	→

図V(2.10)-1 研究開発のスケジュール

(2.10.4)研究開発の実施体制



図V(2.10)-2 研究開発の実施体制

(2.10.5) 事業の管理運営

表 V 2.10-2 バイナリー式温泉発電所を対象としたメカニカルデスケーリング法の研究開発 技術
検討委員会

担当	氏名 (敬称略)	所属
委員長	村岡 洋文	弘前大学北日本新エネルギー研究所 所長・教授
副委員長	藤野 敏雄	株式会社エディット 代表取締役
委員	梅澤 修	横浜国立大学大学院工学研究院 教授
委員	木下 睦	東北大学大学院環境科学研究科 准教授
委員	北澤 実雄	株式会社コベルコ科研 主席部員
委員	清水 誠二	日本大学工学部 教授
委員	福元 裕彦	株式会社コベルコ科研 主席研究員
委員	彭 國義	日本大学工学部 教授

Ⅲ. 研究開発成果について

本事業では、配管を解体せず、源泉を止めずにウォータージェット及びピグを用いた高温の温泉水内で稼働可能なスケール除去技術並びに装置を開発することを目的として、スケール・温泉水の分析、スケール除去実験、モニタリング法及びスケール除去装置の開発を実施した。得られた成果は以下のとおりである。

- ① 従来法並びに新たに開発したデスケーリング工法に関する費用を比較検討し、小浜温泉を想定して配管長や清掃間隔を設定したモデルにおいて、従来法及び新手法の各ケールにおける費用、清掃頻度を検討した結果、いずれのケースも将来的に経済的導入可能性の見込みがあることを確認した。
- ② 温泉スケールの詳細観察、化学分析、力学試験を行い、温泉スケールの結晶形態に由来する弱面が内部に存在していることを確認し、ウォータージェットの衝突により応力を一点に集中させるスケール剥離法が有効であることを提案した。

- ③ 150A までの鋼管を対象として、非破壊で外部からスケール付着厚さを±10mm の精度で測定可能な温度測定式モニタリング装置を開発した。また、スケール厚さのモニタリング履歴に基づき、スケール除去時期を判断するための手法を開発した。

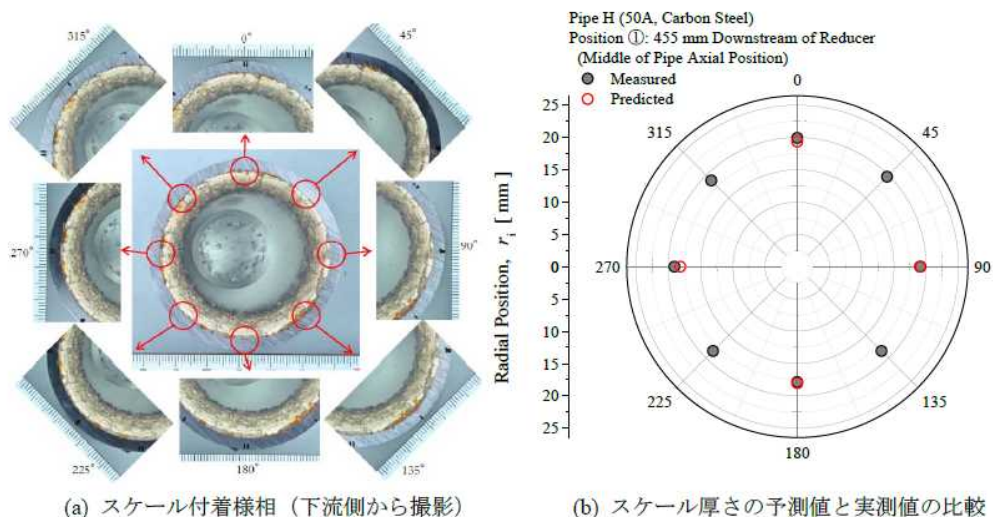


図 V(2.10)-3 配管内 (50A) のスケール予測結果

- ④ 温泉スケールや石膏試料を用いたデスケーリング実験、スケール破壊に関する数値シミュレーションを行い、得られた実験結果より効率的にデスケーリングを行うためのガイドラインを提案した。
- ⑤ 温泉を止めないというメリットを活かして、一般の方法に比してスケール除去の導入・運用コストを従来の方法に比べ 20%以上低減できる技術を開発し、現場実証試験を通じて本技術の有用性を確認した。

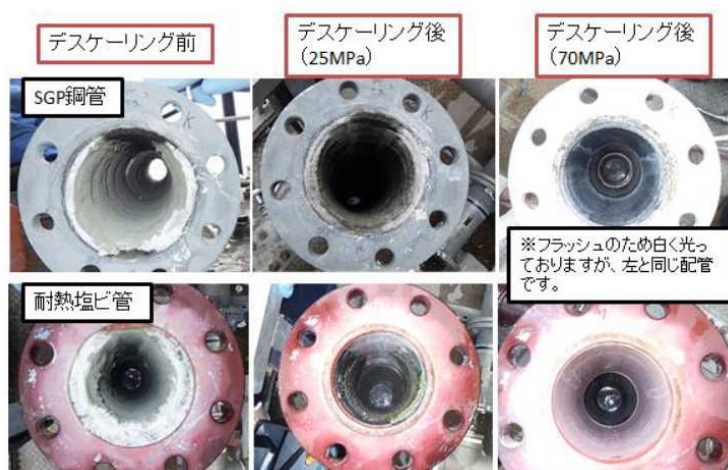


図 V(2.10)-4 デスケーリング前後の配管内の比較

表V(2.10)-3 特許、論文、外部発表等

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表		
	国内	外国	PCT※ 出願	査読 付き	その 他	学会発 表・講演	新聞・雑誌 等への掲載	その他
H26FY	0件	0件	0件	0件	0件	0件	0件	0件
H27FY	1件	0件	0件	0件	0件	4件	0件	0件
H28FY	0件	0件	0件	0件	0件	3件	0件	0件
H29FY	0件	0件	0件	0件	0件	4件	0件	0件

(※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約)

[最終目標に対する成果と達成度]

表V(2.10)-4 最終目標に対する成果と達成度

事業項目	開発目標	成果	達成度
①経済性及び実用化後の波及効果の評価	従来法および新手法における費用、清掃頻度を検討の上、将来的に発電継続が可能になることを踏まえた経済的導入可能性を評価し提示する。	従来法及び新手法による導入・運用コストの経済性を比較し、新手法は、従来法よりも10%以上コスト削減可能との見込みを得た。	○
②スケール構造・組成とスケール強度との関係についての検討解析	スケール及び温泉水の分析ならびにスケールの力学試験結果を基に、鉱物学・結晶学的見地からデスケールリング装置の設計指針を提案する。	デスケールリング装置開発として、以下の2つについて設計指針を得た。 ➤ モニタリング装置 ➤ スケール除去装置	○
③スケール付着計測技術及び装置の開発ならびにスケール除去時期判断手法の開発	スケール付着状況とスケール除去の効果为非破壊で外部から判断可能な温度測定式モニタリング装置を開発する。	スケール付着厚さを±10mmの精度で測定可能な手法を開発した。	○

④スケール除去装置の開発及び評価手法の開発	平成27年度までに常温で稼働可能なデスケリング実験装置を開発する。平成29年度までに源泉を止めずに使用できるデスケリング技術を開発する。	デスケール実験やスケール破壊に関する数値シミュレーションから効率的にデスケリングを行うためのガイドラインを提案した。	○
⑤スケール除去装置の現場性能確認実験	設備利用率の向上を加味して従来法より年間の運用コストが20%以上低減できるスケール除去法を開発する。	50m長の配管に対して、年間運用コストを20%以上低減可能なことを示した。	○

IV. 事業化へ向けての見通しと取組みについて

(1)温度測定式モニタリング装置の開発

①実用化の見込み

温泉・地熱発電分野において、今後、温度測定式モニタリング装置の導入・普及を図っていく。実用化に要する期間は、5～10年程度を見込んでいる。

②課題と取組み

実施事業者や非破壊検査企業・技術コンサルタント企業と連携して、多くの現場で実証試験を積み重ねるとともに、業界認知度を向上するために、学協会・展示会等における技術アピールを併せて実施する。

(2)温泉を止めないメカニカルデスケリング法の開発

①実用化の見込み

温泉分野では、温泉配管洗浄に対する本手法の導入・普及を図っていく。その際、温泉業者にPRして、理解を得ながら受注を取っていく。一方、温泉発電分野では、スケール層の分離手法の確立し、温泉発電にて実証試験を実施する。また、温泉発電事業者にPRして、理解を得ながら実証試験を実施し、受注に努める。実用化に要する期間は、5年程度を見込む。

②課題と取組み

適用性評価データを拡充するために、技術開発を継続実施していく必要がある。業界認知度の向上も重要な課題であり、学協会・展示会等において技術アピールが必要不可欠である。また、技術理解の促進として、関係事業者へのデモンストレーションやプレスリリースを行う予定である。

個別テーマ (2.11)

(2) 低温域の地熱資源有効活用のための小型バイナリー発電システムの開発

(2.11) 環境負荷と伝熱特性を考慮したバイナリー発電用高性能低沸点流体の開発

委託先：国立大学法人東京大学、旭硝子株式会社

II. 研究開発マネジメントについて

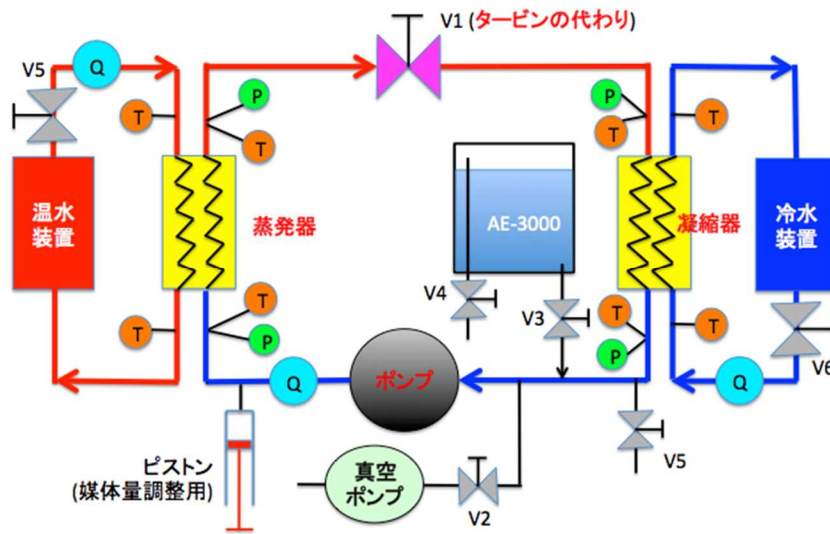
(2.11.1) 背景と目的

我が国では温泉熱エネルギーが全国各地に分布し、温泉熱を発電に利用し地域分散型の電源として利用できるバイナリー発電の導入拡大が期待されている。従来、バイナリー発電にはいくつかの低沸点流体が用いられているが、炭化水素系(n-ペンタン)は可燃性であり、アンモニアは毒性があるため、集客施設や居住地域には不向きである。また、既存のHFC系はオゾン破壊係数(ODP)がゼロであるが、R245faは地球温暖化係数(GWP) 950、AE3000(旭硝子社製)はGWP 580、じょ限量50ppmであり、安全性(可燃性、じょ限量)、GWPについてさらなる検討が必要と考えられている。

本研究では、環境負荷、安全性に加え、熱効率向上およびシステムの小型化のために、粘性係数、熱伝導率、潜熱などの熱流動特性も考慮した、未利用温泉熱の有効活用ができる新たな高性能低沸点媒体を開発することを目的とする。

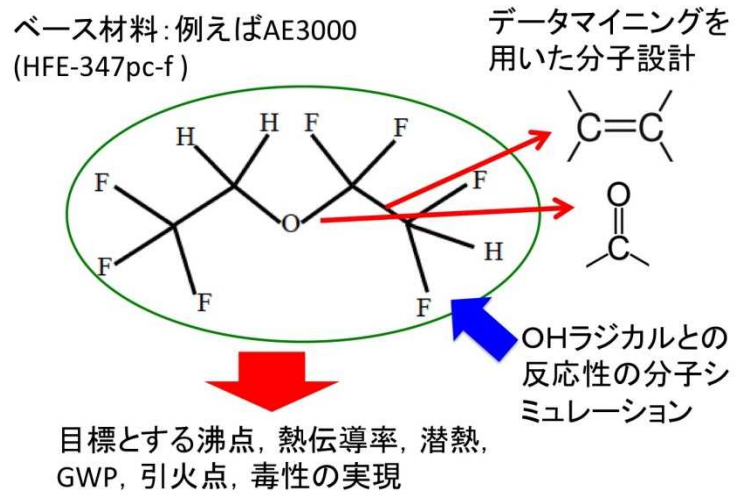
(2.11.2) 研究開発の概要

温泉バイナリー発電用高性能低沸点流体の伝熱解析により、サイクル解析、熱交換器の数値解析・基礎実験に基づき、低沸点流体の熱物性値に対する指針を獲得する。特に、粘性係数、熱伝導率、潜熱などの低沸点作動流体の熱流動特性が、バイナリー発電のエネルギー変換効率、発電システムの必要設置面積に大きな影響のある熱交換器体積に与える感度を求め、熱流動特性から要求される低沸点流体の物性値に対する指針を得る。そして、新たに分子設計・合成された低沸点流体のバイナリー発電の作動流体としての特性を、模擬発電システム(図V(2.11)-1)を用いて系統的に評価する。



図V (2.11)-1 疑似バイナリー発電システム

温泉バイナリー発電用高性能低沸点流体の開発においては、上記伝熱解析により獲得される低沸点流体の設計指針を基に、分子シミュレーションを用いて、沸点、じょ限量、GWP、不燃性に加えて熱流動特性を満たす高性能作動流体の候補を検討し、その物質を合成するための合成ルートを検討する(図V (2.11)-2)。



図V (2.11)-2 新しい低沸点流体の分子設計の概念図

本研究では以下の事業項目を実施する。

<温泉バイナリー発電用高性能低沸点流体の伝熱解析>

①熱交換器シミュレーションによる流体の熱物性値に対する指針獲得

既存のバイナリー発電システムにおいて、熱交換器の占める体積割合は大きく、熱交換器の小型化がシステムの小型化に直結する。低沸点作動流体の熱流動特性がバイナリー発電のエネルギー変換効率、熱交換器(蒸発器および凝縮器)体積に与える感度を数値解析・基礎実験により明らかにし、熱流動特性から低沸点流体に要求される物性値について指針を示す。

②低沸点流体の伝熱性能評価用疑似バイナリー発電システムの構築

低沸点流体の伝熱性能を評価できる疑似バイナリーシステム・テストベンチを構築するため、既設の熱交換器評価実験装置(発電量100W相当)を改良し、計測精度の向上、動作条件の拡大を図る。また、発電量3kW相当のバイナリーサイクル実験装置を新設する。既存の低沸点流体(例えばAE3000)を用いて比較データを取得するとともに、新低沸点流体と既存流体との比較を行い、伝熱性能を総合的に評価する。

③数値解析を用いた新しいバイナリー発電用熱交換器構造の検討

熱交換器(蒸発器および凝縮器)内の熱流動現象は気液相変化を伴う複雑な多相熱流動となり、従来熱交換器の大幅なコンパクト化を実現するためには、詳細な熱流動構造に基づいた新たな熱交換器設計が必須となる。そのため、気液相変化を伴う熱交換器内の複雑な熱流動を精度良く解析するための数値解析技術を開発し、新低沸点流体を仮定した蒸発器・凝縮器の熱流動解析を実施する。それに基づき、よりコンパクトな熱交換器を設計するための指針を得る。

④疑似バイナリー発電システムを用いた新低沸点流体のデータ取得

新規作動流体を用いて疑似バイナリー発電システムにより実験を行い、実際の運転を模擬した条件で伝熱性能を評価する。

⑤コンパクトなバイナリー発電システムの提案

新規作動流体を用いたコンパクトなバイナリー発電システムを構成するための具体的な指針を与える。

<温泉バイナリー発電用高性能低沸点流体の開発>

⑥高性能低沸点作動流体の構造設計

データマイニング、分子シミュレーションを用いて、沸点30～50℃程度、ODPほぼ0、GWP100以下、じょ限量200ppmより大きい（電気事業法改正に伴う緩和規制対象ガス）、不燃性、潤滑油との適合性に加え、伝熱特性についての要求を満たす高性能作動流体の構造設計を実施する。

⑦高性能低沸点作動流体の合成

温泉バイナリー発電システムとして利用可能な新しい高性能作動流体の候補構造に対し、合成ルートを開発するための予備検討を実施する。また、新低沸点流体の合成ルートを考案し、実際の合成を行う。

⑧高性能低沸点作動流体の物性値評価

沸点、ODP、GWP、熱伝導率、潜熱などの物性値を計測し、総合的な物性値評価を行うとともに、初期的な毒性評価を行い、目標が達成できたかどうかを評価する。

表V (2.11)-1 研究開発目標と根拠

事業項目	開発目標	目標レベル設定の根拠
①熱交換器シミュレーションによる流体の熱物性値に対する指針獲得、熱物性値の影響評価、および低沸点流体の燃焼性評価	<ul style="list-style-type: none"> 低沸点流体の物性値指針獲得 基本実験系による熱物性値影響評価 燃焼性評価方法の構築 	熱交換器1次元解析によるモデル評価、および単管管路実験による詳細な伝熱特性評価により、新流体開発に資する基礎的知見を得るため。また、簡便な燃焼性評価を行うため。
②低沸点流体の伝熱性能を評価できるバイナリーシステム・テストベンチ構築	<ul style="list-style-type: none"> タービンを組み込んだバイナリー発電システム 	バイナリー発電・テストベンチを用いた発電性能・熱交換器性能の評価実験を行うため。
③数値解析を用いた新しいバイナリー発電用熱交	<ul style="list-style-type: none"> 3次元数値解析技術 気液相変化を伴う2相流熱流動 	気液相変化を考慮した3次元数値解析により熱交換器

換器構造の検討	解析手法 ・新構造の提案	性能を評価し、コンパクト熱交換器開発のための指針を得るため。
④バイナリーシステムを用いた新作動流体のデータ取得	・新流体の伝熱性能評価 ・既存流体との比較	種々の低沸点流体に対してバイナリーシステムにおける発電特性、伝熱特性を評価するため。
⑤コンパクトなバイナリー発電システムの提案	新流体を用いた小型システムの提案	コンパクトなバイナリー発電システムを構成するための指針を得るため。
⑥高性能低沸点作動流体の構造設計	・シミュレーション技法拡張 ・高性能作動流体の候補構造の決定	目的とする物性を精度良く推算する事で、膨大な構造数から候補構造を絞り込むため。
⑦高性能低沸点作動流体の合成	・合成ルート開発 ・要求仕様を満たす新流体の合成 ・評価用の新流体の合成	合成を工業化可能である事を確認し、新流体の物性、性能を評価する為に必要な量のサンプルを合成するため。
⑧高性能低沸点作動流体の物性値評価	・物性値の計測 ・数値目標：沸点30～50℃程度、ODPほぼ0、GWP100以下 ・初期的なじょ限量評価	実際の新流体の物性等が開発目標に合致していることを確認するため。

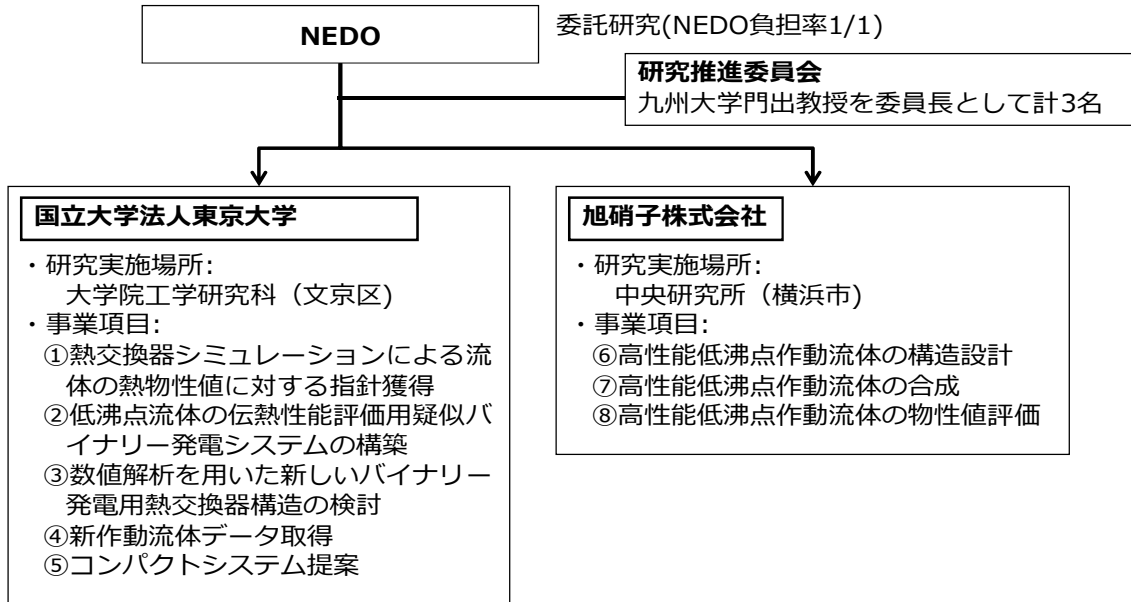
(2.11.3) 事業スケジュール

本事業の研究期間は、平成26年12月25日から平成30年2月28日までである。
事業スケジュールの概要を図V(2.11)-3に示す。

事業項目	H26年度				H27年度				H28年度				H29年度			
	第1 四半 期	第2 四半 期	第3 四半 期	第4 四半 期	第1 四半 期	第2 四半 期	第3 四半 期	第4 四半 期	第1 四半 期	第2 四半 期	第3 四半 期	第4 四半 期	第1 四半 期	第2 四半 期	第3 四半 期	第4 四半 期
バイナリー発電用高性能低沸点作動流体の熱流動解析 (担当：東京大学鈴木研究 ①熱交換器シミュレーションによる流体の熱物性値に対する指針獲得、熱物性値の影響評価、および低沸点流体の燃焼性評価 ②低沸点流体の伝熱性能を評価できるバイナリーシステム・テストベンチ構築 ③数値解析を用いた新しいバイナリー発電用熱交換器構造の検討 ④バイナリー発電システムを用いた新作動流体のデータ取得 ⑤コンパクトなバイナリー発電システムの提案																
バイナリー発電用高性能低沸点作動流体の開発 (担 当：旭硝子株式会社中央研 究所) ⑥高性能低沸点作動流体の構造設計 ⑦高性能低沸点作動流体の合成 ⑧高性能低沸点作動流体の物性値評価																
⑨国内外における最新技術調査(担当：東京大学、旭硝子株式会社) ⑩研究推進委員会の開催(担 当：東京大学)				○	○	○	○		○		○	○		○	○	○

図V(2.11)-3 研究開発のスケジュール

(2.11.4) 研究開発の実施体制



図V (2.11)-4 実施体制図

(2.11.5) 事業の管理運営

表V2.11-2 環境負荷と伝熱特性を考慮したバイナリー発電用高性能低沸点流体の開発
研究推進委員会

担当	氏名 (敬称略)	所属
委員長	門出 政則	九州大学 水素材料先端科学研究センター・特任教授
副委員長	北村 健郎	日本フルオロカーボン協会・事務局長
委員	高橋 俊雄	株式会社 IHI・回転機械セクター開発部バイナリー発電システムグループ部長

III. 研究開発成果について

東京大学では、温泉バイナリー発電用高性能低沸点流体の伝熱解析を担当し、バイナリー発電・テストベンチを用いた発電性能・熱交換器性能の評価実験、詳細な伝熱特性評価のための単管流路実験、燃焼性評価実験、熱交換器内の2相流熱流体数値シミュレーション、および高性能熱交換器の試作評価を行い、低沸点作動流体の熱流動特性がバイナリー発電システム、熱交換性能に及ぼす影響を多角的に調査した。研究成果の概要を以下に列挙する。

- ① スクロールタービンおよび新たに試作した斜め波状壁熱交換器を組み込んだバイナリー発電システムを構築し、種々の低沸点流体に対して発電特性を評価し、動作条件が発電量、システム特性に及ぼす影響を明らかにした。
- ② 斜め波状壁熱交換器における沸騰伝熱特性を新たに開発した2相流熱流体解析手法を用いた3次元数値シミュレーションにより評価した。また、種々の低沸点流体に対して、斜め波状壁熱交換器における沸騰熱伝達率を実験的に計測し、伝熱促進効果を明らかにした。
- ③ 旭硝子株式会社によって分子設計・合成された候補流体を含む種々の低沸点流体に対して、小規模バイナリー作動域に相当する低熱流束・低質量流束条件下における沸騰伝熱特性およびドライアウト特性を系統的に評価した。予熱器・蒸発器・凝縮器からなる熱交換器全体の单相流および二相流伝熱特性を考慮し、新流体開発に資する、基礎的な熱流体工学的知見を獲得した。
- ④ 少量の試料を短時間にスクリーニング可能な流体の燃焼性評価方法を構築し、簡便な評価システムとして有効に機能することを実証した。
- ⑤ 新たな設計コンセプトに基づく高性能熱交換器を提案し、コンパクトなバイナリー発電システムを構成するための具体的な指針を示した。

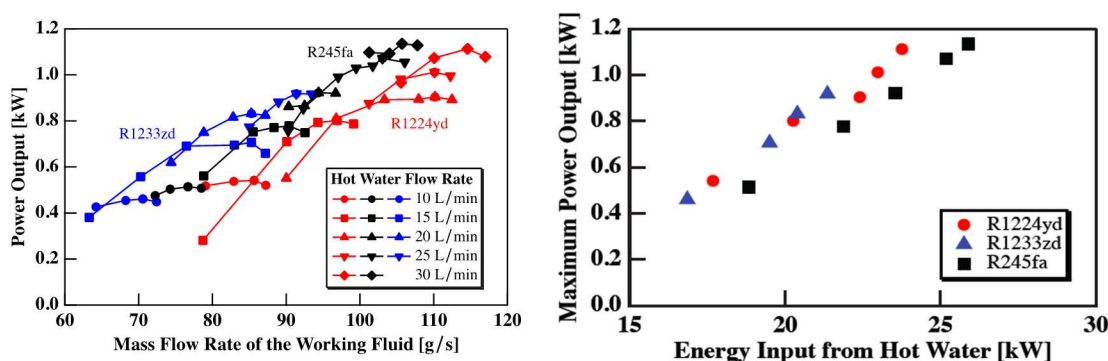


図 V (2.11)-5 異なる作動流体に対する発電特性の比較。

(a) 流量依存性, (b) 最大発電出力と投入熱量の関係

旭硝子では、沸点 30~50℃程度、ODP ほぼ 0、GWP100 以下、低毒性で不燃性の要件

を満たし伝熱特性に優れた高性能低沸点作動流体の構造設計、合成、物性値評価を行った。

- ① これまでハロゲン系化合物に対して培ってきた情報科学的なシミュレーション技法を、バイナリー発電に必要な物性値（沸点、熱伝導度、潜熱など）の推算が可能となる様に拡張して、従来の市販ソフトウェアよりも高い精度で推算できる手法を構築し、熱伝導率が高いことで伝熱性能が良い新低沸点流体の分子構造の候補として十数種類をピックアップした。
- ② これらについて合成方法を検討し、沸点、熱伝導率などの物性値および毒性を測定等により明らかにし、総合的に評価を行った結果、ケトン構造1種類、ケトン構造またはエーテル構造を含む混合物2種類を最終候補として選出した。
- ③ 将来バイナリー発電装置に合わせて新流体の性状改善を行う際などに、消火剤成分が燃焼性低減に有効であることが確認できた。

表V (2.11)-3 最終選定された低沸点流体の物性値（実測値）

	流体の種類、構成	沸点 °C	密度 kg/L	表面張力 mN/m	粘度 mPa·s	蒸発潜熱 kJ/kg	比熱 kJ/kg K	熱伝導率 mW/m K	燃焼性	ODP	GWP	初期毒性
1	構造D (単体)	42	1.33	14.21	0.61	187.2	1.318	86.6	引火無	0	100 以下 (予想)	毒劇物 非該当
2	構造D + t-1,2-ジクロ ロエチレン	36	1.285	14.9	0.43	211	1.310	87	引火無 (予想)	ほぼ0	100 以下 (予想)	毒劇物 非該当 *1
3	構造G + t-1,2-ジクロ ロエチレン	45	1.222	19.6	0.43	268	1.290	107	限定的な 燃焼性 *2	ほぼ0	100 以下 (予想)	毒劇物 非該当 *1
	目標	30~ 50	—	—	—	—	—	高熱伝導 率	なし	ほぼ0	100 以下	毒劇物 非該当

いずれも常温（20～25℃）における物性値。混合物は共沸組成での物性値。

*1 各成分がそれぞれ単独で毒劇物非該当

*2 混合液の温度が-10℃付近の場合にのみ引火有り。それ以外の温度では引火無し。

表V (2.11)-4 特許、論文、外部発表等

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表		
	国内	外国	PCT※ 出願	査読 付き	その 他	学会発 表・講演	新聞・雑 誌等への 掲載	その他
H26FY	0件	0件	0件	0件	0件	0件	0件	0件
H27FY	0件	0件	0件	0件	0件	0件	0件	0件
H28FY	0件	0件	0件	0件	0件	0件	0件	0件
H29FY	2件	0件	0件	0件	0件	6件	0件	0件

(※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約)

[最終目標に対する成果と達成度]

表V (2.11)-5 最終目標に対する成果と達成度

開発項目	開発目標	成果	達成度
①熱交換器シミュレーションによる流体の熱物性値に対する指針獲得、熱物性値の影響評価、および低沸点流体の燃焼性評価	<ul style="list-style-type: none"> ・低沸点流体の物性値指針獲得 ・基本実験系による熱物性値影響評価 ・燃焼性評価方法の構築 	<p>熱交換器1次元解析により物性値指針を得た。</p> <p>単管流路実験により詳細な沸騰伝熱特性に対する基礎的知見を獲得した。</p> <p>高速スクリーニングのための燃焼性評価方法を構築した。</p>	○ (達成)
②低沸点流体の伝熱性能を評価できるバイナリーシステム・テストベンチ構築	<ul style="list-style-type: none"> ・タービンを組み込んだバイナリー発電システム 	<p>スクロールタービンおよび斜め波状壁熱交換器を組み込んだバイナリー発電システムを構築した。</p>	○ (達成)
③数値解析を用いた新しいバイナリー発電用熱交換器構造の検討	<ul style="list-style-type: none"> ・3次元数値解析技術 ・気液相変化を伴う2相流熱流動解析手法 ・新構造の提案 	<p>斜め波状壁熱交換器における沸騰伝熱特性を3次元数値解析により評価した。</p>	○ (達成)
④バイナリーシステムを用いた新作動流体のデータ取得	<ul style="list-style-type: none"> ・新流体の伝熱性能評価 ・既存流体との比較 	<p>種々の低沸点流体に対して発電特性、伝熱特性を評価した。</p>	○ (達成)
⑤コンパクトなバイナリー発電システムの提案	<ul style="list-style-type: none"> ・コンパクトシステムの提案 	<p>新コンセプトに基づく高性能熱交換器を提案し、コンパクトシステムの設計指針を得た。</p>	○ (達成)

⑥ 高性能低沸点作動流体の構造設計	・シミュレーション技法拡張 ・高性能作動流体の候補構造の決定	バイナリー発電に必要な物性値(沸点、熱伝導度、潜熱など)の推算手法を構築し、分子構造の候補構造13種類を選出した。	○ (達成)
⑦ 高性能低沸点作動流体の合成	・合成ルート開発 ・要求仕様を満たす新流体の合成 ・評価用の新流体の合成	合成可能と確認された構造について、物性値評価および東京大学で実施する評価試験等に用いる試料を合成した。	○ (達成)
⑧ 高性能低沸点作動流体の物性値評価	・物性値の計測 ・数値目標：沸点 30～50℃程度、ODP ほぼ 0、GWP100 以下 ・初期的なじょ限量評価	初期毒性評価で低毒性と確認された構造について、その混合物も含めて物性を評価し、要件を満たす最適な物を3種類(混合物含む)選出した。	○ (達成)

IV. 事業化へ向けての見通しと取組みについて

(a) 一般的なフロン代替物による燃焼性抑制

- ① 引火点を持つ化合物(構造E、F、G、H、I)については、一般的に使用されている燃焼性が無いフロン代替物を混合することで燃焼性を抑制することが考えられる。
- ② 現時点で実用化されているGWPが100以下のフロン代替物はいずれも沸点が低く20℃以下の物(オレフィン構造)のみで、構造E、F、G、H、Iとは沸点差が大きいと共沸混合物を形成しにくく、仮に共沸混合物を形成してもその沸点が20℃を下回るため目標とする沸点(30～50℃程度)とはならない。
- ③ 適するのはGWPが100以下で沸点が40℃程度～60℃程度(共沸による沸点低下を見込む)のフロン代替物であるが、将来そのようなフロン代替物が実用化されれば、それを混合することで燃焼性を抑制できる可能性がある。
- ④ 予察として、現在広く使用されているフロン代替物のHFE-347pc-f(旭硝子AE-3000、沸点56℃、GWP580)を構造E、構造Gに混合して引火性を確認した所、HFE-347pc-fを40～70wt%程度混合すれば引火が見られなくなった。

(b) 消火剤成分の応用

- ① 前述の様に、消火剤成分は少量添加で燃焼性の低減に大きな効果があることが確認された。
- ② 今回最終選定された低沸点流体には使用されなかったが、将来バイナリー発電装置に合わせて新流体の性状を改善する際や、小型バイナリー発電に限らず広く作動流体を開発する際に有効に利用できる可能性がある。

個別テーマ(3.1)

(3)発電所の環境保全対策技術開発

(3.2) 硫化水素拡散予測シミュレーションモデルの研究開発

委託研究先: 日揮、明星大学

II. 研究開発マネジメントについて(事業の計画内容)

(3.1.1)背景と目的

エネルギー自給率がわずか4パーセントの我が国において、平成23年3月11日に発生した東日本大震災以降、国内の電力供給能力が著しく低下している中で、ベースロード電源としての地熱発電への期待の高まりから、各地で地熱発電開発の計画が進められている。既に復興予算などが福島県内の地熱発電プロジェクトなどに投入され、地元での説明会が開かれるようになってきている。平成25年4月から環境影響評価手続きに配慮書・方法書・準備書・評価書と一連の文書が求められるようになったことにより、手続きに要する期間が全体で4年超と長期間にわたることが、地熱開発を進める上での障害となっており、手続きに要する期間の短縮への期待が大きい。

地熱発電所に係る環境影響評価では、国のガイドラインである「改訂・発電所に係る環境影響評価の手引」(平成27年、経済産業省電力安全課)があり、採取した地熱流体を起源として稼働時に冷却塔から大気放出される硫化水素の拡散予測については、以下が「参考手法」とされている。

「その着地濃度の予測は地形、建物の影響及び排気の上昇過程の相似性を考慮した風洞実験により行う。なお、風洞実験に代替できる数値計算モデルが開発された場合は、それに基づく理論拡散式で硫化水素の着地濃度を予測する。」

上記は「環境影響評価法」(平成9年)施行後の手引きであり、これに基づく実施例は存在しないが、過去に「発電所の立地に関する環境影響調査及び環境審査の強化について」(昭和52年、通産省省議決定)により行われた環境影響評価では、いずれの地熱発電所計画も、風洞実験による予測が行われている。

この風洞実験に要する事業者の時間的・経済的負担は大きく、一方、これを解決する手段である「風洞実験に代替される数値計算モデル」が現状では存在しない。このため、「発電所設置の際の環境アセスメントの迅速化等に関する連絡会議 中間報告」(平成24年11月、環境省・経済産業省)において、「経済産業省は、地熱発電において、硫化水素に係る環境影響を予測するために必要な風洞実験に要する期間を短縮するため、当該予測に用いる計算シミュレーションの開発等について検討する。」とされたところである。

本研究は、国の地熱開発促進への取組みの一環として検討が進められる環境アセスメント迅速化方策の一つとして提言されている硫化水素拡散予測評価期間短縮化の必要性に鑑みて、予測評価期間および費用を半減するための、風洞実験に代わる硫化水素拡散予測数値モデルを開発することにより、環境アセスメントの円滑化に資することを目的とする。

(3.2.2)研究開発の概要

本研究では、地熱発電所に係る環境アセスメントの際の硫化水素拡散予測評価に要する期間および費用の半減を目標として、CFD(Computational Fluid Dynamics)の汎用コードを用いて、風洞実験の代替となり得る硫化水素拡散予測数値モデルの開発を行う。そのため、国内の地熱発電所等における硫化水素放散に関する環境影響評価等の先行事例の調査に基づき、予測上考慮すべき因子を抽出し、数値モデル構築に当たり考慮すべきパラメータ等を明確化する。次に抽出した硫化水素拡散挙動影響因子の影響を踏まえて、CFDの汎用コードを用いて数値モデルを構築する。

さらに、開発モデル検証のための風洞実験を実施し、風洞実験結果と数値モデルによる予測評価結果の比較により、開発モデルの性能評価を行う。また、開発モデルの環境アセスメントへの適用を想定して、国のガイドラインである「発電所に係る環境影響評価の手引」への反映を図るべく、当該手引の変更案の検討を行う。

表 II (3.1)-1 研究開発目標と根拠

事業項目	研究開発目標	目標レベル設定の根拠
①硫化水素の拡散挙動の調査	硫化水素拡散予測評価を実施する上で考慮する必要のある、硫化水素の拡散挙動に影響する因子を明確化するとともに、拡散予測数値モデル構築に当たり、考慮すべきパラメータ等を明確化することを目標とする。	◆地熱発電開発の迅速化 環境アセスメントにおける硫化水素拡散予測の風洞実験は期間とコストを要し、期間短縮と費用低減が必要。
②硫化水素拡散予測数値モデルの構築	先行事例の風洞実験結果との比較検討を通じて改善を図り、風洞実験の代替となり得る数値モデルを構築する。	◆課題 硫化水素拡散予測評価のための風洞実験に代替できる手法が無い。
③硫化水素拡散予測数値モデルの性能評価	開発する数値モデルが、環境影響評価において風洞実験に代替可能であり、これを用いた予測評価が、風洞実験を用いた予測評価に比べて、効率的かつ効果的であることを検証すること、並びに開発する数値モデルを検証するための適切な風洞実験を実施することを目標とする。	◆対策 風洞実験に代わる硫化水素拡散予測シミュレーションモデルを開発し、従来の風洞実験によりも、評価期間と費用の低減を図る。

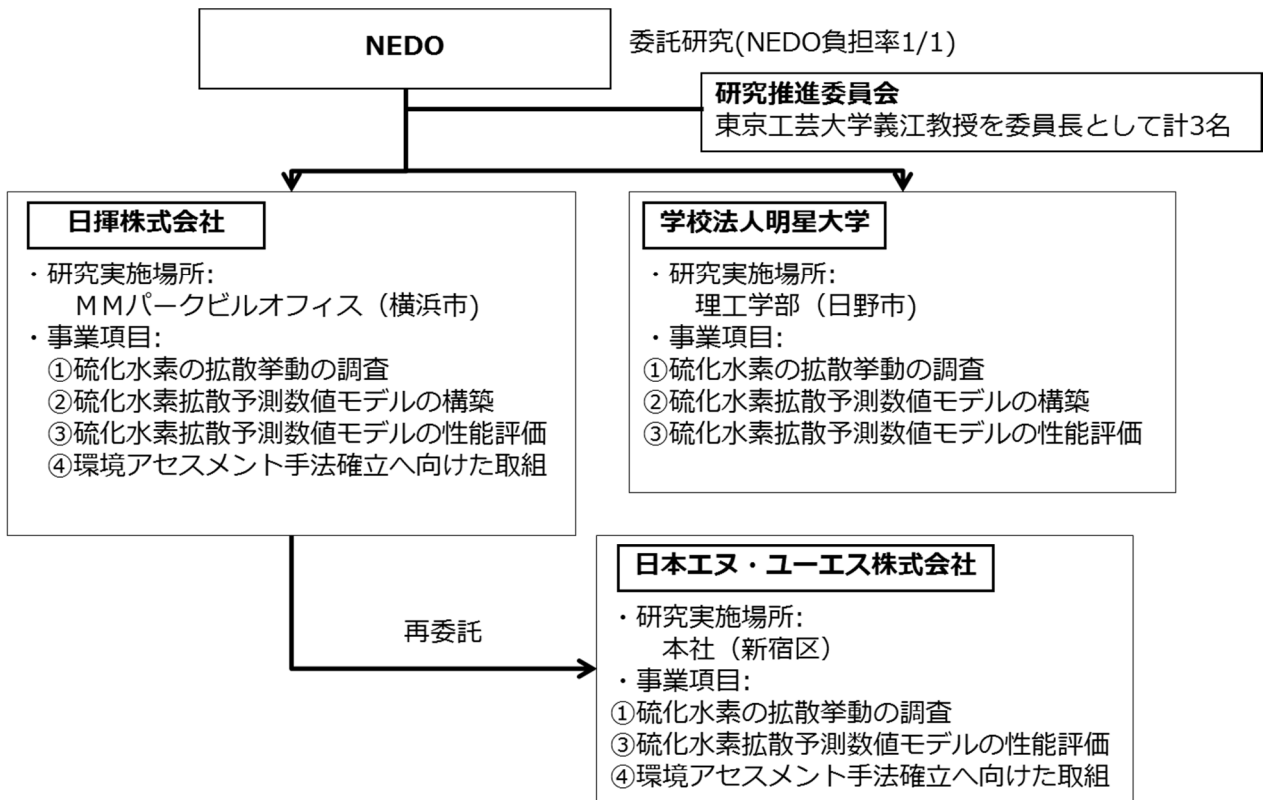
(3.1.3)事業スケジュール

本事業の研究期間は、平成25年9月2日より平成28年2月28日までで、主な事業スケジュールの概要を図 II (3.1)-1に示す。平成25年度後期は、硫化水素の拡散挙動に影響する因子ならびに拡散予測評価シミュレーションモデル構築に当たり考慮すべきパラメータ等を明確化した。平成26年度は、過去の風洞実験結果との比較検証を通じて硫化水素拡散予測シミュレーションモデルの構築ならびにH27年度に実施する性能評価のための風洞実験計画を策定した。平成27年度は、風洞実験の実施、CFD計算結果と風洞実験結果の比較による性能検証ならびに環境影響評価手法への反映検討を実施した。また、有識者委員会は延べ5回実施した。

研究開発項目	25年度				26年度				27年度			
	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q
①硫化水素の拡散挙動の調査	影響因子調査/数値モデル予備検討											
②硫化水素拡散予測数値モデルの構築					数値モデル構築							
③硫化水素拡散予測数値モデルの性能評価					風洞実験計画策定				風洞実験実施			
									数値モデルの性能評価			
④環境アセスメント手法確立へ向けた取組									環境影響評価手引への反映検討			

図 II (3.2)-3 研究開発のスケジュール

(3.1.4)研究開発の実施体制



(3.1.5)研究開発の運営管理

表Ⅱ(3.1)-2 硫化水素拡散予測シミュレーションモデルの研究開発 技術検討委員会

日揮株式会社
学校法人明星大学

担当	氏名 (敬称略)	所属
委員長	義江 龍一郎	東京工芸大学 工学部 建築学科 教授
委員	野田 徹郎	国立研究開発法人産業技術総合研究所 地圏資源環境研究部門 顧問
委員	井上 和也	国立研究開発法人産業技術総合研究所 安全科学研究部門環境暴露モテリンググループ 主幹

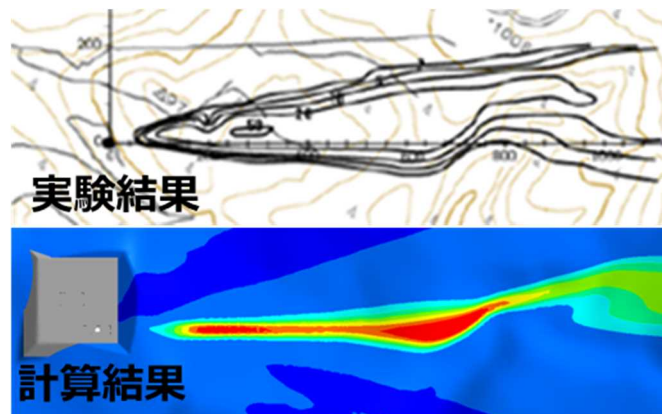
所属は、委員会組織時点のもの

Ⅲ. 研究開発成果について

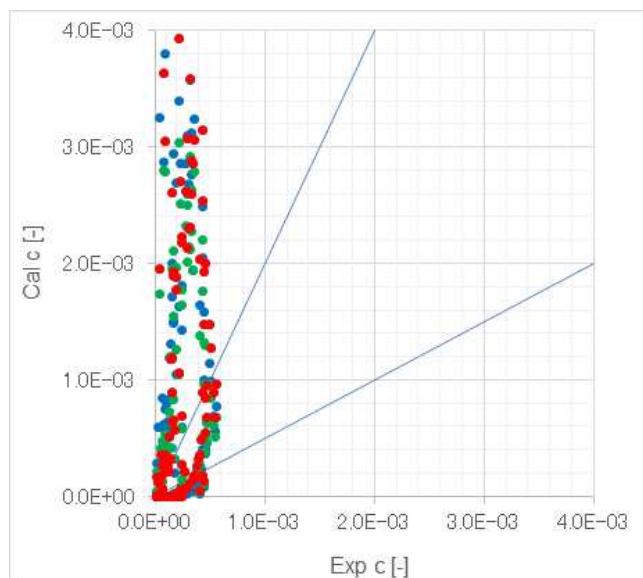
硫化水素の拡散挙動の調査に関しては、国内の地熱発電所等における硫化水素放散に関する環境影響評価等の先行事例の調査に基づく硫化水素の拡散挙動に影響する因子の調査、ならびに硫化水素拡散予測数値モデル構築に係る予備検討を実施することにより、拡散予測評価シミュレーションモデル構築に当たり考慮すべきパラメータ等を明確化した。

硫化水素拡散予測数値モデルの構築に関しては、CFD の汎用コードを用いて、抽出した硫化水素拡散挙動影響因子の影響を踏まえて、拡散予測評価を行うための数値モデルを整備した。硫化水素拡散予測の予測精度に影響する乱流モデルについては、実績が高く、かつ作業時間の短い標準 $k-\epsilon$ を代表とする RANS モデルを採用した。さらに、その数値モデルを用いて、先行事例における具体的な地形、気象等に係る影響因子を考慮した再現予測計算検討を通じて改善を図った。

硫化水素拡散予測数値モデルの性能評価に関しては、硫化水素拡散予測数値モデルの性能評価を行うための風洞実験計画を策定し、それに基づいた風洞実験を行い、比較検証に必要な計測データを取得した。さらに、風洞実験模型の地形データに基づいて、対象地点の計算モデルを作成した。それら計算モデルごとに、数値モデルによる計算を実施して着地濃度等の計算結果を得た。着地濃度等の計算結果と風洞実験による計測値を比較して、性能評価を行った。数値モデルによる計算結果と風洞実験計測結果の比較データから、硫化水素拡散予測数値モデルの妥当性の検討・評価を行った。比較検証した結果、計算による主流方向の速度分布は、複雑な地形にも関わらず、実験結果を比較的良好に再現できた。一方、拡散については、排気拡散幅が狭く、かつ排気上昇高さが低くなり、着地ガス濃度が高くなった。そのため、拡散に関わるモデルパラメータである乱流シュミット数を導入したが、着地ガス濃度は数倍程度の誤差を含む場合があった。RANS による数値モデルでは、複雑地形が乱流発生に大きく影響して、乱流エネルギーを過大評価した可能性が高い。これらを解決するためには、複雑地形によって生じる乱流を適切に表現する乱流モデルの開発が課題となる。開発した数値モデルの評価精度に関しては、当初、ファクター2 (FAC2) 0.5 程度を目標としていたが、達成できなかった理由として、風洞実験内地形で複雑に発生する乱流の状況を RANS モデルによって適切に再現できていないという技術的な問題が存在すると考えられる。今後解決するためには、地形形状による乱流発生状況を表現するように、乱流シュミット数を適切に設定する手法などの乱流モデルの開発が必要と考えられる。また地形形状により予測精度に大きな差異が生じる場合も見られたため、地形の複雑さの度合いと、予測精度の関係をより詳細に検討することも重要と考えられる。



図Ⅲ (3.1)-1 風洞実験及び数値モデル計算から得られた着地濃度分布



図Ⅲ(3.1)-2 風洞実験及び数値モデル計算から得られた着地濃度分布の比較

表Ⅲ(3.1)-1 特許、論文、外部発表等

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表		
	国内	外国	PCT [※] 出願	査読付き	その他	学会発表・講演	新聞・雑誌等への掲載	その他
H25FY	0件	0件	0件	0件	0件	0件	0件	0件
H26FY	0件	0件	0件	0件	0件	3件	0件	0件
H27FY	0件	0件	0件	0件	0件	3件	0件	0件
H28FY	0件	0件	0件	0件	0件	1件	0件	1件
H29FY	0件	0件	0件	0件	0件	1件	0件	0件

(※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約)

[最終目標に対する成果と達成度]

表Ⅲ(3.1)-2 最終目標に対する成果と達成度

事業項目	最終目標 (平成 27 年度末)	成果	達成度
①硫化水素の拡散挙動の調査	硫化水素拡散予測評価を実施する上で考慮する必要のある、硫化水素の拡散挙動に影響する因子を明確化するとともに、拡散予測数値モデル構築に当たり、考慮すべきパラメータ等を明確化することを目標とする。	国内の地熱発電所等における硫化水素放散に関する環境影響評価等の先行事例の調査等を行い、拡散予測評価シミュレーションモデル構築に当たり考慮すべきパラメータ等を明確化した。	○
②硫化水素拡散予測数値モデルの構築	先行事例の風洞実験結果との比較検討を通じて改善を図り、風洞実験の代替となり得る数値モデルを構築する。	抽出した硫化水素拡散挙動影響因子の影響を踏まえて、拡散予測評価を行うための数値モデルを整備した。	○
③硫化水素拡散予測数値モデルの性能評価	開発する数値モデルが、環境影響評価において風洞実験に代替可能であり、これを用いた予測評価が、風洞実験を用いた予測評価に比べて、効率的かつ効果的であることを検証すること、並びに開発する数値モデルを検証するための適切な風洞実験を実施することを目標とする。	風洞実験結果と数値モデルによる計算結果を比較評価した結果、目標とする評価精度を達成できなかった。	△ 地形形状による乱流発生状況を表現するための、乱流シュミット数を適切に設定する手法などの乱流モデルの開発が必要

IV. 実用化に向けての見通し及び取り組みについて

今回の開発において、風洞実験に乱流モデルとしてRANSを採用した数値モデルを適用して、実験結果と計算結果を比較評価した。その結果、環境アセスメントにおいて、風洞実験の代替となり得る評価精度に達しなかった。達成できなかった理由として、風洞実験内地形で複雑に発生する乱流の状況をRANSモデルによって適切に再現できていないという技術的な問題が存在すると考えられる。今後解決するためには、地形形状による乱流発生状況を表現するように、乱流シュミット数を適切に設定する手法などの乱流モデルの開発が必要と考えられる。また地形形状により予測精度に大きな差異が生じる場合も見られたため、地形の複雑さの度合いと、予測精度の関係をより詳細に検討することも重要と考えられる。今後、今回の開発によって得られた課題を解決することにより、実用化に近づくと考えられる。

個別テーマ(3.2)

(3)発電所の環境保全対策技術開発

(3.2)地熱発電所に係る環境アセスメントのための硫化水素拡散予測数値モデルの開発

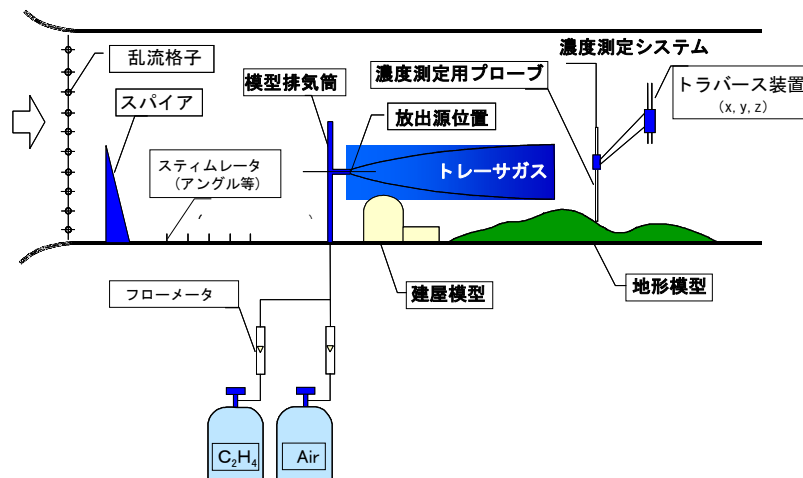
共同研究先:電力中央研究所

II. 研究開発マネジメントについて(事業の計画内容)

(3.2.1)背景と目的

2010年6月に「エネルギー基本計画」が閣議決定され、その中で、地熱発電は2030年までに設備容量165万kW(2007年度実績 53万kW)、発電電力量103億kWh(2007年度実績 30億kWh)の導入拡大が掲げられている。2011年の東日本大震災以降、再生可能エネルギー導入拡大が望まれる中、世界第3位となる地熱資源を有する我が国では、ベース電源として活用可能な地熱発電が大きな注目を集めている。

地熱発電所建設時の環境アセスメントでは、冷却塔からの排気に含まれる硫化水素について、発電所計画地点周辺における着地濃度を予測することが定められている。硫化水素の拡散は、周辺の地形および冷却塔建物の影響を大きく受けるため、その予測は地形、建物の影響および排気の上昇過程の相似性を考慮した風洞実験により行う(図II(3.2)-1)。「改訂・発電所に係る環境影響評価の手引」(経済産業省 電力安全課)には、「風洞実験に代替できる数値モデルが開発された場合は、それに基づく理論拡散式で予測する」と示されているが、地形、建物の影響および排気の上昇過程を再現できる数値モデルはこれまで開発されていない。風洞実験の実施には、実験設備確保や模型製作、実験実施期間の制約から予測評価が長期化する懸念があることから、硫化水素の拡散予測に用いる数値モデルの開発が課題となっている。



図II(3.2)-1 風洞実験を用いた排ガス拡散予測手法の概要

これまで、火力発電所の環境アセスメントおよび原子力発電所の安全解析の分野では、風洞実験の代替として数値モデルの開発・実用化が進められてきた。火力発電所に係る環境アセスメントで使用されている排ガス拡散予測数値モデルは、約100m以上の点源(煙突)から排出される硫黄酸化物および窒素酸化物等の大気拡散を対象とし、周囲の地形影響を考慮して風下20~30km範囲の地表濃度および最大着地濃度を予測する。敷地内の建物の影響等は考慮しない。一方、原子力発電所の安全解析における放出源の有効高さを求めるための数値モデルは、高さ数10m~100m前後の点源(排気筒)から放出される放射性物質の大気拡散を対象とし、周囲の地形や建物の影響を考慮して風下5km範囲の地表濃度分布より放出源の有効高さを評価する。火力発電所および原子力発電所を対象とした数値モデルはいずれも比較的高所に位置する点源からの排ガス拡散を対象としているため、排ガスの上昇過程に与える地形、建屋の影響は考慮していない。これに対し、地熱発電所は一般に山岳地域に建設されることが多いため、周囲の地形影響が顕著であり、また冷却塔は高さが数10m程度と低いため、浮力および運動量を有する排気の上昇・拡散過程に

与える地形、建屋の影響を考慮することが重要となる。このことから、火力・原子力発電所用の数値モデルをそのまま地熱発電所の硫化水素拡散予測に適用することはできない(表Ⅱ(3.2)-1)。

表Ⅱ(3.2)-1 発電所を対象とした排ガス拡散数値モデルの概要

発電所 (モデル名)	排ガス 拡散物質	放出条件&拡散への影響要因			評価対象	備考
		放出条件	影響要因・建屋	影響要因・地形		
火力発電所 (地形影響モデル)	硫黄酸化物 窒素酸化物 など	①放出位置 : 点源(煙突) ②排ガス上昇 : 対象外 ③放出高さ : 約100m以上	・影響なし (静力モデル)	・影響あり (敷地内は無し)	(1)範囲 : 風下 30km (2)評価項目 : 地表濃度・最大濃度	・経産省の手引きに反映済み。
地熱発電所 (詳細モデル)	硫化水素	①放出位置 : <u>面源(冷却塔)</u> ②排ガス上昇 : <u>浮力+運動量</u> ③放出高さ : <u>数10m程度</u>	・影響あり (非静力モデル)	・影響あり (敷地内外、 非常に複雑)	(1)評価範囲 : 風下 5km (2)評価項目 : 最大濃度	・当該研究開発テーマとして実施
原子力発電所 (有効高さ評価モデル)	ヨウ素 希ガス など	①放出位置 : 点源(排気筒) ②排ガス上昇 : 対象外 ③放出高さ : 数10~100m前後	・影響あり (非静力モデル ~建屋影響を解像 するため。)	・影響あり (敷地内外、複雑 な場合もあり)	(1)評価範囲 : 風下 5km (2)評価項目 : 放出源の有効 高さ	・原子力学会の実施基準として反映済み。 ・原子力発電所の安全性の解析の一環。

本研究開発では、地熱発電所に係る環境アセスメントにおける排ガス拡散予測評価に必要な期間の短縮および費用削減を目的とし、風洞実験の代替として用いることができる硫化水素拡散予測数値モデルを開発する。

(3.2.2)研究開発の概要

本研究開発では、地熱発電所周辺の地形起伏や冷却塔建物高さ、排ガス諸元等の適用条件やモデル開発に要する期間、費用等を考慮して、簡易予測数値モデルおよび詳細予測数値モデルの二種類の硫化水素拡散予測数値モデルを開発する。至近の地熱発電所の環境アセスメントでの手続きの迅速化が求められる際には、簡易予測数値モデルの適用を図るとともに、その後の詳細な適用条件の再現が求められる際には、詳細予測数値モデルの適用を図る。開発した数値モデルを実用化し、実際の発電所の環境アセスメントで使用することが可能となるよう、有識者により構成される委員会を設立して研究評価を受けるとともに、技術の公知化および各種規定類への反映を図る。風洞実験の代替として用いることができる硫化水素拡散予測数値モデルを開発することにより、環境アセスメントにおける拡散予測評価に必要な期間(現行の風洞実験では約6ヶ月)および費用を半減させることを目標とする。

表Ⅱ(3.2)-2 研究開発目標と根拠

事業項目	開発目標	目標レベル設定の根拠
①硫化水素拡散予測数値モデルの開発	地熱発電所に係る環境アセスメントにおける排ガス拡散予測評価に必要な期間および費用を半減させることを目標とし、現行のアセスで行われている風洞実験の代替として用いることができる硫化水素拡散予測数値モデルを開発する。	発電所の排ガス拡散予測については、既に火力発電所および原子力発電所を対象とした数値モデルが開発され、実用化に至っている。いずれも風洞実験を実施する場合に比べて期間・費用の大幅な削減が可能となっている。

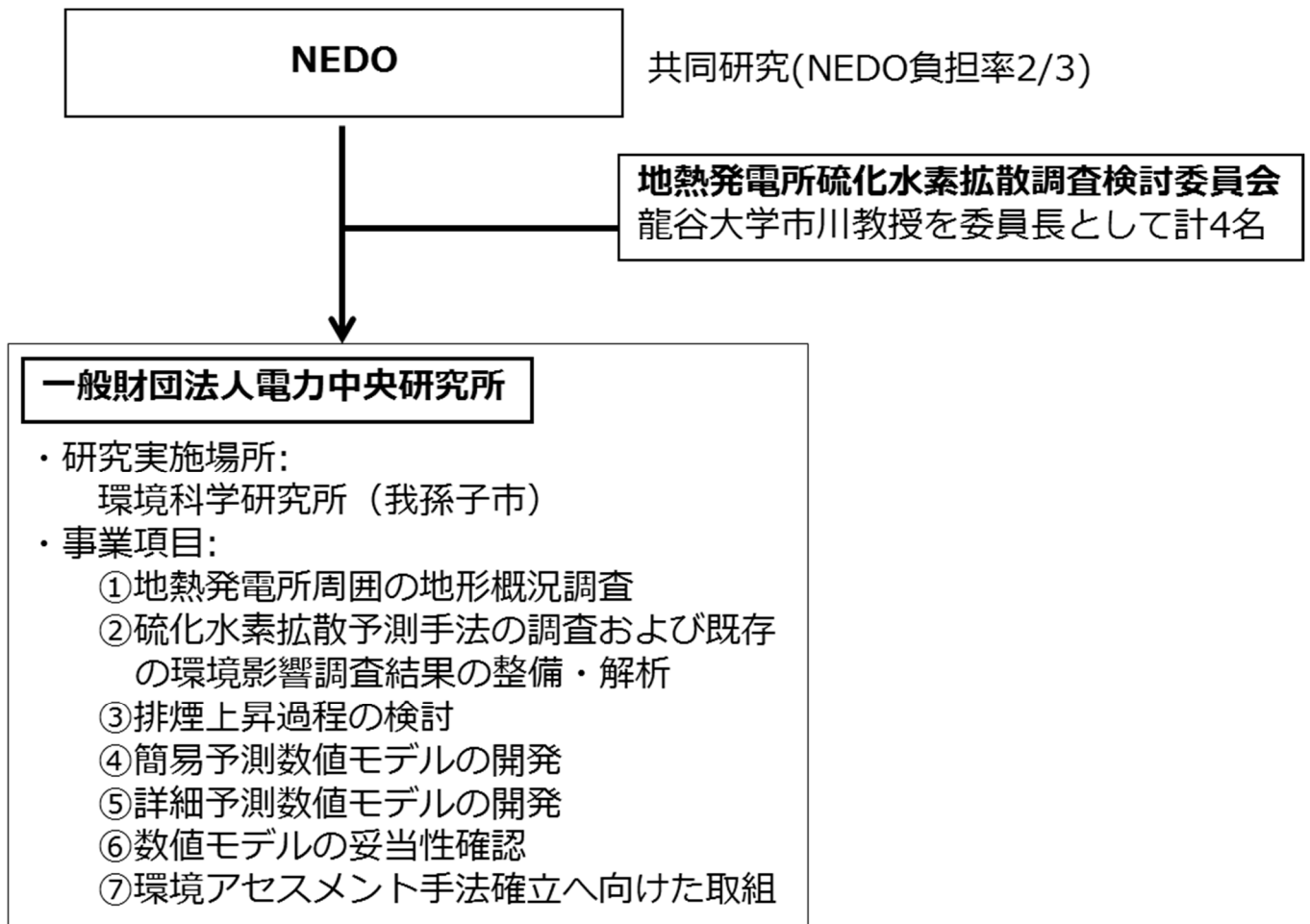
(3.2.3)事業スケジュール

本事業の研究期間は、平成25年8月1日から平成28年2月28日までで、事業スケジュールの概要を図Ⅱ(3.2)-3に示す。平成25年度後期から平成27年度前期にかけて数値モデルの開発および精度検証用実験データの取得・整備を行った。実験データとの比較に基づく妥当性確認は平成27年末まで実施した。調査検討委員会は延べ6回実施した。

事業項目	25年度				26年度				27年度			
	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q
①地熱発電所周囲の地形概況調査			← 調査・検討 →									
②硫化水素拡散予測手法の調査および既存の環境影響調査結果の整備・解析			← 事例調査・データ整備 →									
③排煙上昇過程の検討			← 風洞実験 →									
④簡易予測数値モデルの開発			← 開発・改良 →									
⑤詳細予測数値モデルの開発			← 開発・改良 →									
⑥数値モデルの妥当性確認							← 妥当性確認 →					
⑦環境アセスメント手法確立へ向けた取組			← 評価・公知化 →									

図Ⅱ(3.2)-3 研究開発のスケジュール

(3.2.4)研究開発の実施体制



(3.2.5)研究開発の運営管理

表Ⅱ(3.2)-4 地熱発電所に係る環境アセスメントのための硫化水素拡散予測数値モデルの開発 地熱発電所
硫化水素拡散調査検討委員会

一般財団法人電力中央研究所

担当	氏名 (敬称略)	所属
委員長	市川 陽一	学校法人龍谷大学
委員	近藤 裕昭	国立研究開発法人産業技術総合研究所
委員	野田 徹郎	国立研究開発法人産業技術総合研究所
委員 (平成27年2月4日まで)	津崎 英男	電気事業連合会
委員 (平成27年2月5日より)	岡峰 克幸	電気事業連合会

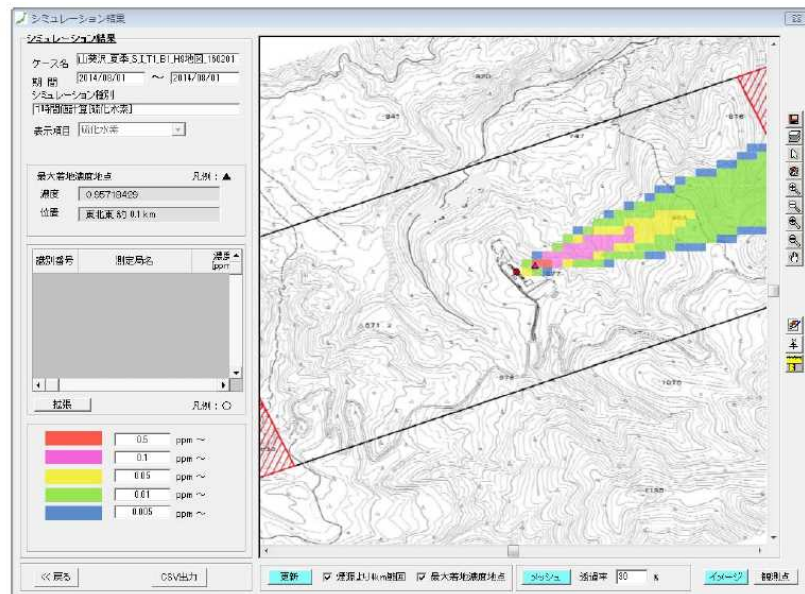
所属は、委員会組織時点のもの

Ⅲ. 研究開発成果について

地熱発電所に係る環境アセスメントにおける排ガス拡散予測評価に必要な期間の短縮および費用削減を目的とし、風洞実験の代替として用いることができる二種類の硫化水素拡散予測数値モデル（簡易予測数値モデル、詳細予測数値モデル）を開発した。また、地熱発電所の冷却塔からの排気拡散を模擬した風洞実験を実施し、風洞実験結果との比較を通じて開発した数値モデルの予測精度を検証した。

開発した数値モデルの予測精度を検証するため、発電所周辺の地形的特徴が異なる2地点を選定し、発電所構内の主要建屋および周辺地形を模擬した風洞実験を実施した。実験対象として選定した地点は、発電所周辺に孤立峰が存在する地形や、風向に直交する方向に複数の尾根が連なる地形などの複雑な地形的特徴を有する。風洞実験では、複数の風向・風速・気温条件に対し、冷却塔模型から放出したトレーサガスの着地濃度や空間濃度を計測した。

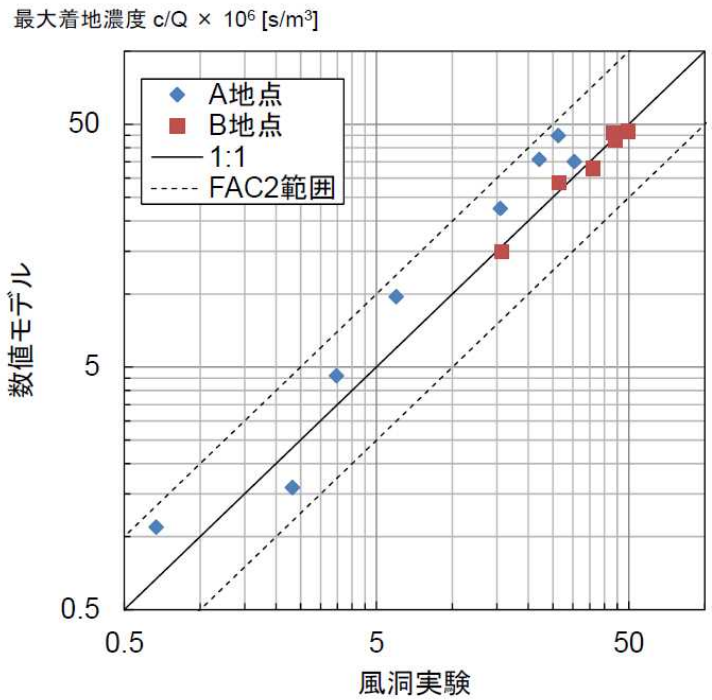
簡易予測数値モデルを用いて風洞実験の再現計算を行った結果、排気諸元や建屋・地形、浮力条件を適切に設定することにより、風洞実験で得られた最大着地濃度を概ね良く再現することが可能であり、環境アセスメントの事前検討や配慮書作成等に活用できることが分かった（図Ⅲ(3.2)-1 簡易予測数値モデル）



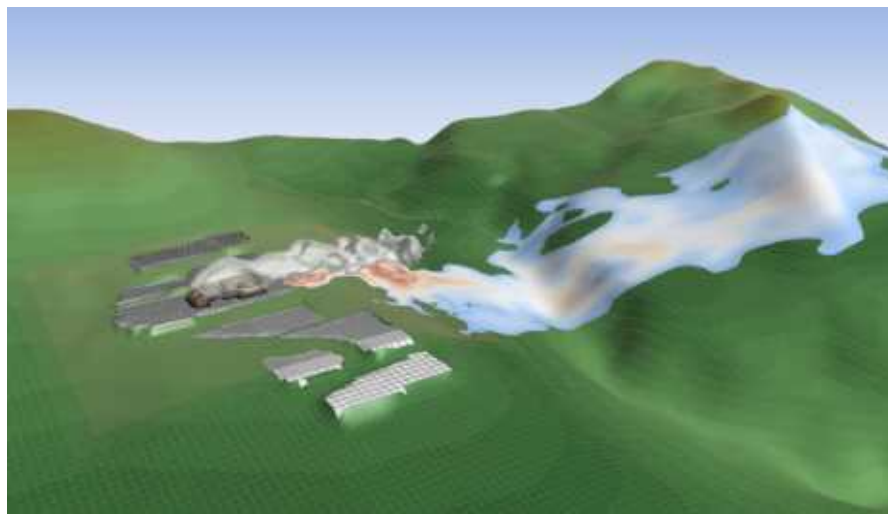
図Ⅲ(3.2)-1 簡易予測数値モデル

一方、詳細予測数値モデルを用いて再現計算を行った結果、周辺地形や発電所建屋を精緻に再現することにより、硫化水素の着地濃度および空間濃度を高精度で予測可能であり（図Ⅲ(3.2)-2 風洞実験と詳細予測モデルによる最大着地濃度の比較）、風洞実験の代替として環境アセスメントに適用することができることが明らかとなった（図Ⅲ(3.2)-3 詳細モデルによる着地濃度の可視化イメージ）。

本研究では、開発した数値モデルを実際の地熱発電所に係る環境アセスメントで使用することが可能となるよう、有識者により構成される委員会を設立し、計6回の委員会開催を通じて、研究開発に対する助言と評価および審議を得た。



図Ⅲ(3.2)-2 風洞実験と詳細予測モデルによる最大着地濃度の比較



図Ⅲ(3.2)-3 詳細モデルによる着地濃度の可視化イメージ

表Ⅲ(3.2)-1 特許、論文、外部発表等

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表		
	国内	外国	PCT [※] 出願	査読付き	その他	学会発表・講演	新聞・雑誌等への掲載	その他
H25FY	0件	0件	0件	0件	0件	0件	0件	0件
H26FY	0件	0件	0件	0件	0件	5件	1件	0件
H27FY	0件	0件	0件	0件	1件	5件	0件	0件
H28FY	0件	0件	0件	2件	1件	1件	0件	1件
H29FY	0件	0件	0件	0件	0件	0件	0件	0件

(※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約)

[最終目標に対する成果と達成度]

表Ⅲ(3.2)-2 最終目標に対する成果と達成度

事業項目	最終目標 (平成 27 年度末)	成果	達成見通し
硫化水素拡散予測数値モデルの開発	地熱発電所に係る環境アセスメントにおける排ガス拡散予測評価に必要な期間および費用を半減させるための硫化水素拡散予測数値モデルを開発する。	風洞実験の代替として用いることができる二種類の硫化水素拡散予測数値モデル（簡易予測数値モデル、詳細予測数値モデル）を開発した。	○（達成）

IV. 実用化に向けての見通し及び取り組みについて

本研究で開発した数値モデルは、「発電所に係る環境影響評価の手引(経済産業省 商務流通保安グループ 電力安全課、平成29年5月改訂)」において奨励ツールとして掲載され、風洞実験の代替として冷却塔排気に含まれる硫化水素の拡散予測に用いることが認められた。

これまでに2地点の地熱発電所(安比地熱発電所、鬼首地熱発電所)の環境アセスメントにおいて、硫化水素の拡散予測に用いられた。

個別テーマ(3.3)

(3) 発電所の環境保全対策技術開発

(3.3) 温泉と共生した地熱発電のための簡易遠隔温泉モニタリング装置の研究開発

国立研究開発法人産業技術総合研究所
地熱エンジニアリング株式会社
横河電機株式会社

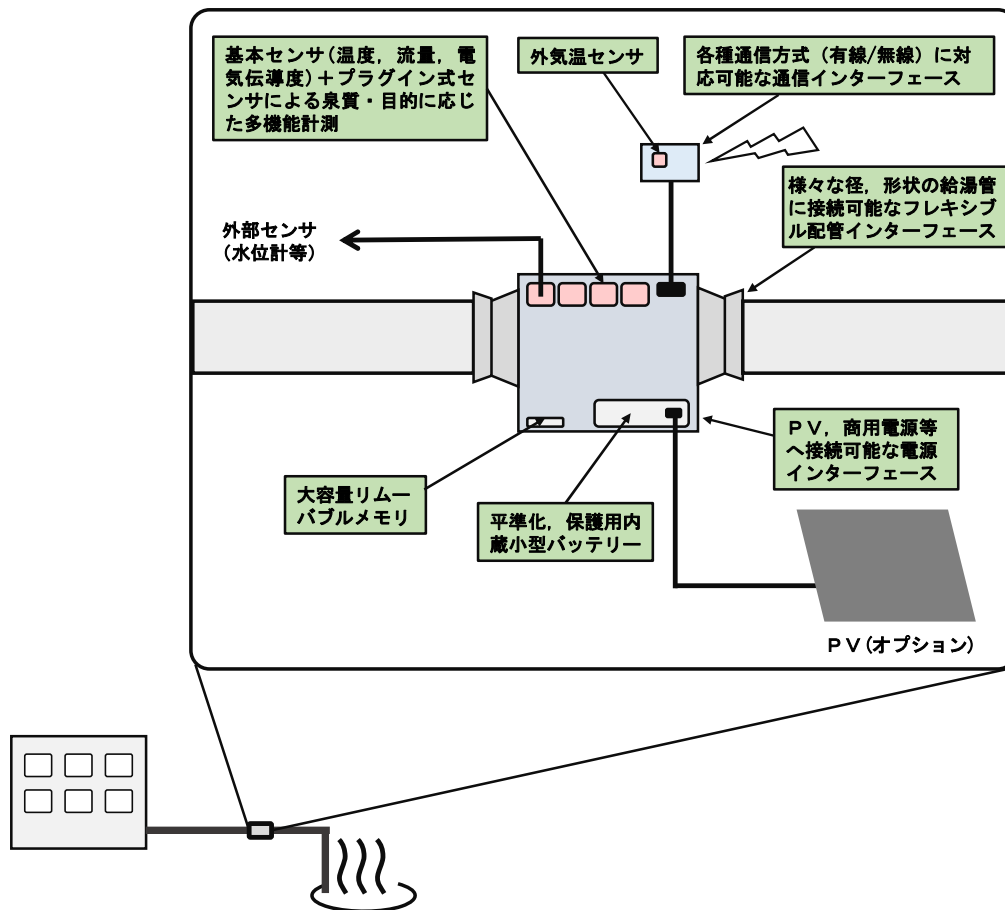
II. 研究開発マネジメントについて(事業の計画内容)

(3.3.1) 背景と目的

我が国における地熱エネルギーの開発には多くの阻害要因が存在するが、それらの中には、地熱発電と温泉との共存という我が国固有の問題が存在する。温泉事業者の多くは地熱発電に起因する温泉湧出量の減少や、泉質の変化に対して危惧を抱いているため、地熱発電所の開発や運転に反対の意思を示す事例が多い。

発電事業者と温泉事業者間の合意を形成するためには様々な方策があるが、温泉変動に関する正確なデータを取得し、それに基づいた科学的な説明を行うことが問題解決につながるひとつのアプローチである。しかし、温泉の泉質や湧出量は様々な要因により、短期的、長期的に変動している事例がある(例えば池田、東野、1984)ため、現在行われているスポット的な温泉モニタリングでは変動を正確に把握することは困難である。温泉変動をより正確に把握するためにはサンプリング間隔を密にすればよいが、コストの制約から現状の方式で実現するのは容易ではない。正確かつ連続的な温泉モニタリングの重要性については、ガイドライン、報告書等でも言及されているが(NEDO、環境省、日本地熱学会等)、そのための専用ハードウェアの開発は行われていないことが、温泉モニタリングを実現する上での大きな問題となっている。

本事業は、上述の背景を鑑み、温泉の変動を遠隔モニタリング可能な機器を開発することを目的として実施している。本機器はプラグイン型センサユニット、フレキシブル配管インターフェース、有線/無線インターフェース等より構成され、泉質や設置場所の状況に応じて構成を容易に変更可能なものとし、1,000台程度導入時に一台20万円程度の価格となることを目指す。現在、国内には27,000を超える源泉があり(環境省、平成24年)、これらの1割で本モニタリング装置が使用されれば、5億4000万円程度の売り上げを見込め、また、メンテナンスにかかるビジネスも創出される。



図Ⅱ(3.3)-1 本事業で開発する温泉モニタリング装置の概念図

温泉は多様な泉質を有し、また、揚湯ポンプ、貯湯装置等、事例により異なる様々なシステムを介して利用されている。また、温泉地域の多くは山間地にあり、電源や高速通信回線の利用に制限が加えられることが多い。これらのことを踏まえて、本事業では以下の特徴を有する装置を開発する。

- (a)温泉配管に取り付けることを基本とし、様々な配管へ取り付け可能な配管インターフェースを具有。
- (b)温泉の基本的なデータ(温度、管内流量、電気伝導度)を測定する機能を有し、温泉井の水位、各種化学物質濃度等のモニタリングをプラグイン式センサにより実現可能。
- (c)取得したデータに有意な変化が現れた場合、通信回線を介して管理者へ連絡する機能を具有。
- (d)センサは、耐熱性を有することに加え、自己洗浄機能、性能劣化自己診断機能を有し、熱や鉱物析出等の影響に対し頑強。
- (e)現地の状況に応じて携帯電話回線、有線回線等を選択可能。
- (f)現地の状況に応じて商用電源、PV、バッテリーから給電可能。
- (g)バックアップ用大容量メモリを内蔵し、通信回線の遮断や、電源機能の低下時にもデータの損失を回避可能。

(3.3.2)研究開発の概要

本事業では平成26年9月から平成30年3月末までの期間に、以下の研究開発を実施する。

- ① プロトタイプ的设计
 - ①a. 現状調査・予備試験：流体モニタリング用センサ，OA用マイコン機器，データ通信方式，温泉での配管について現状調査を行う。また，本装置での使用が想定されるセンサの試験等を行う。
 - ①b. 概念設計：本装置の外形，構造，素材，機能を決定するとともに，現状調査・予備試験の結果を参考に，各部の詳細仕様を決定する。

- ①c. 詳細設計：本装置の形状・構造，電子回路部，ソフトウェア部について詳細設計を行う。
- ②プロトタイプを試作
 - ②a. プロトタイプ試作：温泉地での実証試験に使用可能なプロトタイプを試作する。
 - ②b. 室内性能評価実験：産業技術総合研究所福島再生可能エネルギー研究所内に温泉配管を模擬した実験装置を設置し，プロトタイプ装置の性能評価を実施する。
- ③プロトタイプの改良

上記設計と試作の結果を踏まえ，温泉地での実証試験を想定したプロトタイプの改良を行う。
- ④実証試験：東北地方・九州地方を中心とする，泉質の異なる複数の温泉地に本装置を設置し，データを取得する。データの信頼性，実用性能等について評価する。
- ⑤実用モデル設計・試作
 - ⑤a. 実用モデル設計：室内性能評価試験，および実証試験の結果をもとに，実用モデルの最終設計図，回路図，フローチャート等を作成する。
 - ⑤b. 実用モデル製作：実用モデルを製作し，室内性能評価装置を用いて性能を評価する。
- ⑥自立電源のフィージビリティスタディ：温度差発電とPVについて，設置やメンテナンス等の付帯費用も含め，その経済性を評価する。また，温度差発電の実現性・経済性を評価するための実験を実施する。
- ⑦開発推進委員会の開催：温泉研究者，センシング技術等を専門とする有識者からなる開発推進委員会を設置し，本事業に対する評価，および助言を得る。
- ⑧まとめ

本システムに今後必要となる改良点等を取りまとめる。
 本機器の商品化へ向けた以下の取り組みを行う

 - (a) 価格低減のための取組
 - (b) 導入拡大へ向けた取組

平成29年度の本事業終了時点での達成目標は以下の通りである。

*温泉地域で長期(1年以上)にわたり連続使用可能なモニタリング装置のプロトタイプを実現する。本装置は以下の仕様・性能を有する。

外形：	300 mm(W)×200 mm(H)×200 mm(D)以下
重量：	4 kg以下
温泉水温度：	80 °C以下
流量測定能力：	範囲 10～100 L/min、分解能 0.1 L/min
温度測定能力：	範囲 0～80 °C、分解能 0.1 °C
電気伝導度：	0.01 mS/cm
プラグインセンサ：	水位計、Cl濃度センサ、水温計、圧力センサを接続可能
サンプリングレート：	1 sample/min
データ通信：	3G回線、LTE回線、ISDN回線、NTT光回線を使ったデータ転送が可能
配管インターフェース：	温泉地で用いられている代表的な複数種類の配管への接続が可能

*本装置の量産時目標価格を20万円とし、それを達成するためのコストの削減手法、条件等を提案し、商品化の体制を示す。

表Ⅱ (3.3)-1 研究開発目標と根拠

事業項目	研究開発目標	目標レベル設定の根拠
①プロトタイプ的设计	実証試験に使用可能なプロトタイプを设计する	源泉調査, 既存機器調査, 既往研究調査等の結果をもとに決定
②プロトタイプの試作	従来品の流量計, 温度計, 電気伝導率計を個別に組み合わせた計測装置に比べ, 長さで1/5, 重量で1/10程度小型化した実証試験で使用するプロトタイプを試作する	源泉調査, 既存機器調査, 既往研究調査等の結果をもとに決定
③プロトタイプの改良	プロトタイプを改良し, 実証試験に使用可能な性能を持たせる	源泉調査, 既存機器調査, 既往研究調査等の結果をもとに決定
④実証試験	泉質の異なる複数の温泉地でデータを取得するとともにデータの信頼性, 実用性能等について評価する	源泉調査結果をもとに決定
⑤実用モデル设计, 試作	製品時の基本的な構成・構造を実現する	源泉調査, 既存機器調査, 既往研究調査等の結果をもとに決定
⑥自立電源のFS	温度差発電とPVについて, 経済性を評価する	プロトタイプ性能評価結果, 源泉状況により決定
⑦まとめ	本装置の実用化時の製造コストならびにコスト低減のための手法を取りまとめる	市場調査結果等をもとに決定

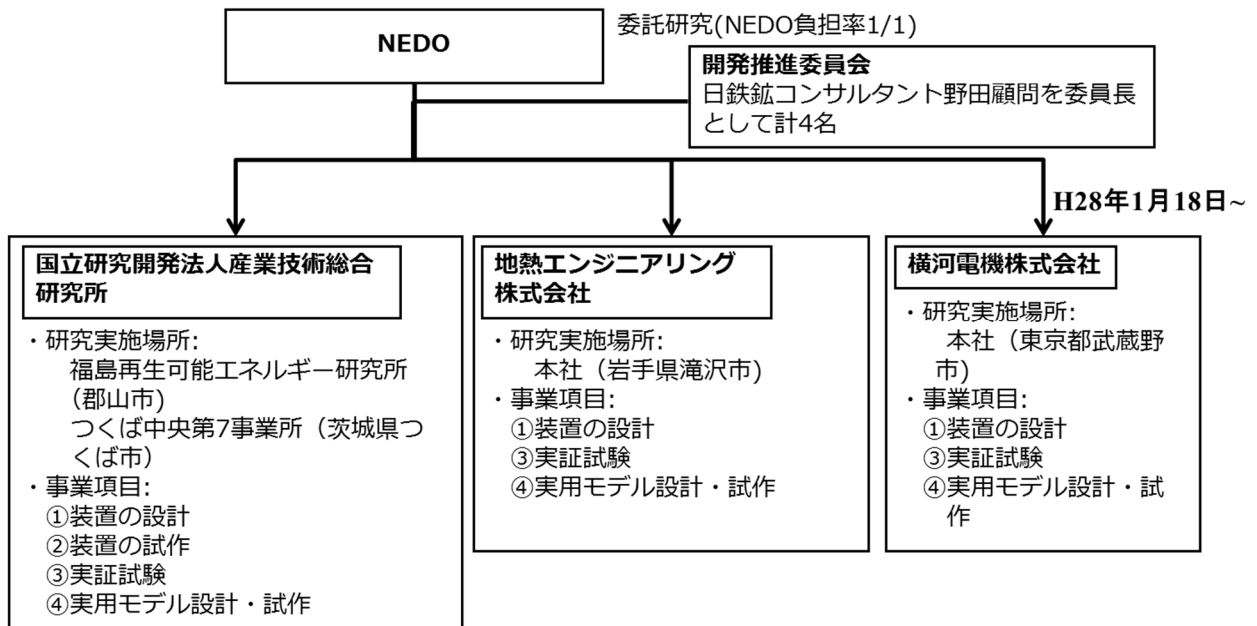
(3.3.3)事業スケジュール

本事業の研究期間は、平成26年度から平成29年度末までで、主な事業スケジュールの概要を図Ⅱ(3.3)-3に示す。9回の開発推進委員会を開催し、外部有識者からの指導を受けた。

事業項目	平成 26 年度				平成 27 年度				平成 28 年度				平成 29 年度			
	第 1 四半期	第 2 四半期	第 3 四半期	第 4 四半期	第 1 四半期	第 2 四半期	第 3 四半期	第 4 四半期	第 1 四半期	第 2 四半期	第 3 四半期	第 4 四半期	第 1 四半期	第 2 四半期	第 3 四半期	第 4 四半期
①プロトタイプ的设计																
現状調査・予備試験			→													
概念設計			→	→												
詳細設計			→	→	→											
②プロトタイプの試作																
プロトタイプ試作					→	→	→	→								
室内性能評価実験					→	→	→	→								
③プロトタイプの改良									→	→	→	→				
④実証試験										→	→	→	→	→	→	→
⑤実用モデル設計・試作																
設計													→	→	→	→
試作													→	→	→	→
⑥自立電源の F S										→	→	→	→	→	→	→
⑦開発推進委員会			○	○		○		○		○		○		○		○
⑧まとめ																→
中間評価						○										

図Ⅱ(3.3)-3 研究開発のスケジュール

(3.3.4)研究開発の実施体制



(3.3.5)研究開発の運営管理

表Ⅱ (3.3)-2. 温泉と共生した地熱発電のための簡易遠隔温泉モニタリング装置の
研究開発 開発推進委員会

国立研究開発法人産業技術総合研究所
地熱エンジニアリング株式会社
横河電機株式会社

担当	氏名 (敬称略)	所属
委員長	野田徹郎	日鉄鉱コンサルタント 顧問
副委員長	益子 保	公益財団法人中央温泉研究所 所長
委員	田籠功一	西日本技術開発株式会社 地熱業務本部副本部長
委員	戸津健太郎	東北大学マイクロシステム融合研究開発センター 准教授

所属は、委員会組織時点のもの

Ⅲ. 研究開発成果について

①プロトタイプ的设计

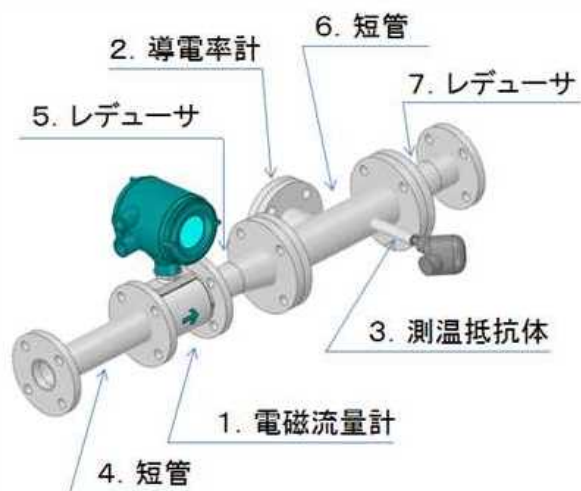
- *工業用，運輸機器用，環境モニタリング用を代表とする種々の分野で使用されている流体センシング用センサの現状調査を行った。本装置への使用が可能なセンサを購入し，性能評価，本装置への組み込み可能性を検討し，最終的に本装置で使用するセンサを決定した。
- *国内の温泉における，温泉水の採取方法，配管について調査を行うとともに，実証試験が可能な地域について検討した。
- *データ転送のためのハードウェア，通信方式，コスト等について調査を行い，本装置への導入可能性を検討した。
- *本装置の外形，構造，素材，機能を決定するとともに，現状調査・予備試験の結果を参考に，各部の詳細仕様を決定した。

②プロトタイプの試作

- *性能評価のために必要なシステムを設計した。福島再生可能エネルギー研究所地熱チーム実験室内に，室内性能評価装置を設置し，実験室内での性能評価を可能にした。
- *温泉モニタリング装置のプロトタイプを作成し，室内性能評価実験を通じて改良が必要な点を抽出し，改良を施した。

表Ⅲ(3.3)-1.プロトタイプ1号機の仕様

項目	単位	仕様値	設計・試作結果
温泉水温度測定範囲 (接液部の温度)	℃	60	60 以上
配管径	mm	25Φ or 50Φ	50
取付フランジ	—	—	JIS10K 50A
電源	V	100	100
消費電流	W	—	61
流量計計測範囲	L/min	10~100	10~100
流量計計測分解能※	L/min	0.1	0.1 以下
温度計計測範囲	℃	0~60	0 以下~60 以上
温度計の分解能※	℃	0.1	0.1 以下
センサ部外形寸法	mm	—	1000×420×335
記録・通信部外形寸法	mm	—	213×156×95
電源 BOX,変換器寸法	mm	—	300×400×200
使用温度範囲	℃	—	0~50
流量計	—	電磁流量計	電磁流量計
サンプルレート	Sample/min	0.1	0.1 以上
使用想定装置	—	導電率計 圧力計	導電率計 圧力計



図Ⅲ(3.3)-1 試作したプロトタイプ

③プロトタイプの改良

*実証試験に向け、プロトタイプでの改良点を反映した実証試験器を製作した。

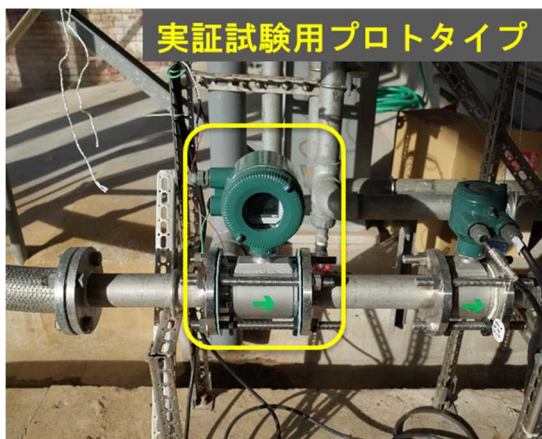
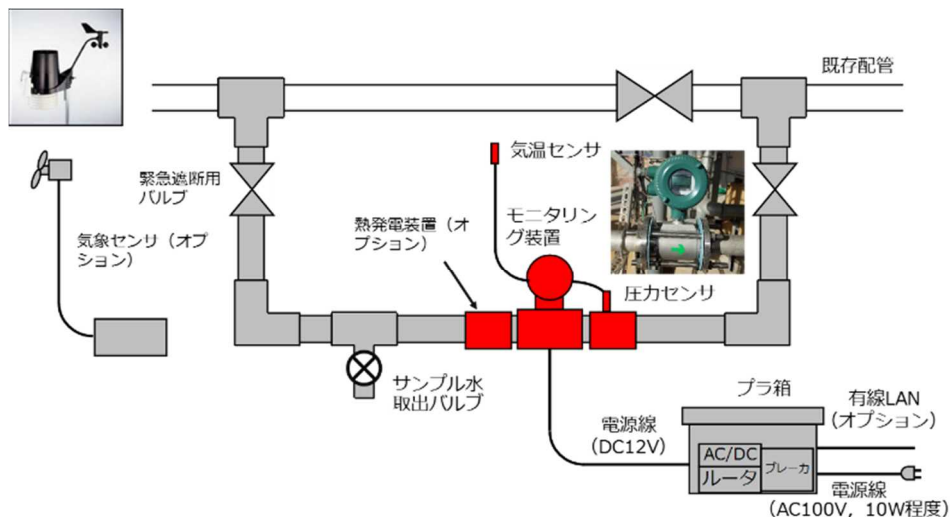
表Ⅲ(3.3)-2. 実証試験器の目標仕様

項目	仕様	判定
外形	(目標値) 600mm(W)×500mm(H)×500mm(D)程度 (結果) 165mm(W)×291mm(H)×197mm(D)	○
重量	(目標値) 10kg 以下 (結果) 4.2kg 以下	○
温泉水温度	(目標値) 60℃以下 (結果)100℃以上	○
流量測定能力	(目標値) 範囲 10～100L/min (結果)範囲 10～100L/min 以上	○
温度測定能力	(目標値) 範囲 0～60℃, 分解能 0.1℃ (結果) -200～400℃, 分解能 0.1℃	○
電気伝導率	(目標値) 0.01mS/cm (結果) 分解能 0.01mS/cm	○
プラグインセンサ	(目標値) 水位計, 水温計を接続可能 (結果) 1～5V 入力, 4～20mA 入力にて対応※	○
サンプリングレート	(目標値) 0.1sample/min (結果) 1sample/min	○
データ通信	(目標値) 3G 回線を使ったデータ転送が可能 (結果) ルータを用いて 3G 回線を使用可能	○

※1～5V, 4～20mA 出力の水位計, 水温計を接続可能。

④実証試験

*国内で 11 地点の実証試験地を決定し、配管の設計、必要な手続き等を行った後、プロトタイプを設置し、概ね 1.5 年間データ取得を行い、データの信頼性と実用性能について評価と課題の抽出を実施した。



図Ⅲ(3.3)-2 実証試験

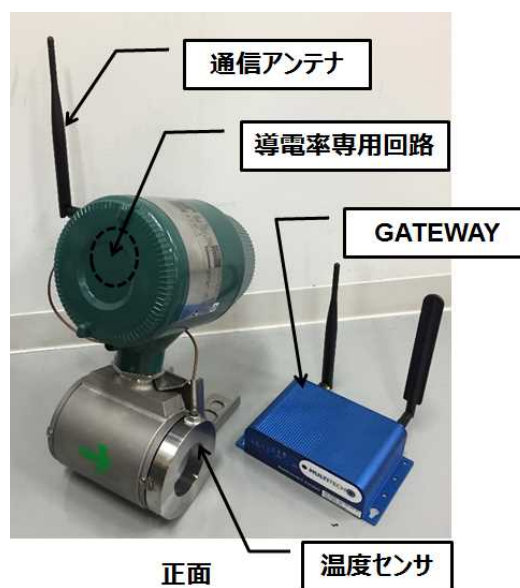
スケール付着が少ない場所での流量・温度計測は、良好な計測が実現できる見通しを得た。一方、スケール付着の多い場所では、スケール付着に起因する精度の悪化が見られた。スケール付着については、実験と理論的考察を組み合わせることで、特定地域における見解ではあるものの、1mm 以下のスケール厚みまで流量計測精度が現状の測定方法（容器による測定精度 3.2%）と同等であるとの見解を示した。この見解は、実運用上においてユーザーが本研究で開発した温泉モニタリング装置を採用、メンテナンス実施時に、利用可能な有益な情報と考えている。電気伝導度計測は、スケール付着が多い場所では使用できないものの、スケール付着の影響が少ない場所では、測定周波数を調整し、流量計測回路と電気伝導度計測回路を分離したことにより、50mS/cm の電気伝導度計測を実現した。

⑤実用モデル設計・試作

実証試験で得られた課題(無線通信距離,設置・メンテナンス性の改善等)の改善案を組み込んだ設計・試作を実施した。無線については、低消費電力・長距離無線である LPWA を採用した。また、計測データはクラウドに自動で送付され、クラウドサーバ上で、グラフ化や現在値の表示を実現した。組立性改善のための取付部材、バックカバーの重量により装置の重量が 400g(10%)程度目標を超過したものの、その他の仕様については、目標を達成できる見込みを得るとともに、製品基本構成を作り上げた。

表Ⅲ(3.3)-4. 実用モデルの製作結果

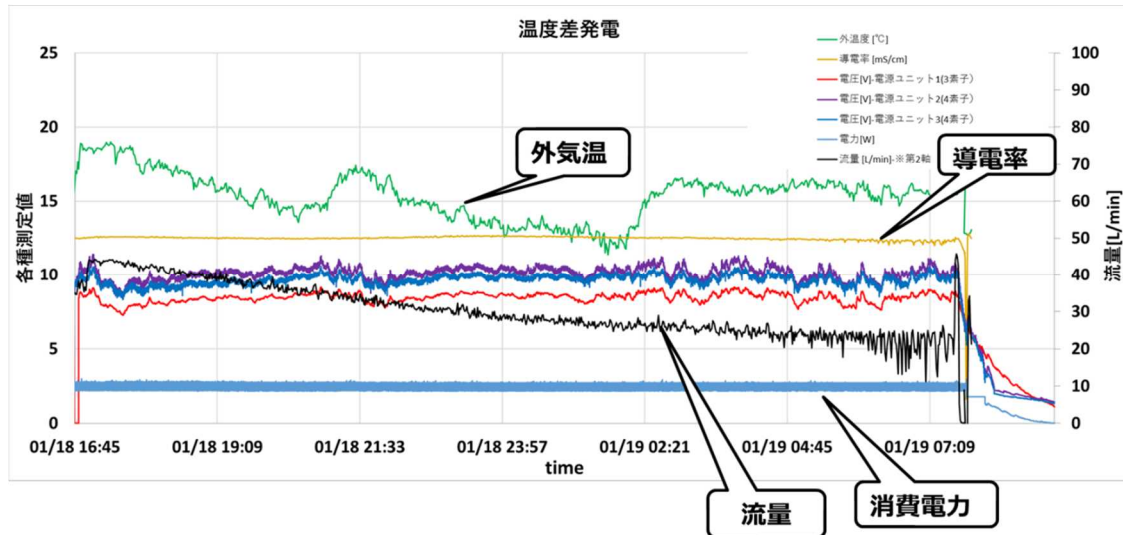
項目	仕様	判定
外形 (25A)	(目標値) 300mm(W)×200mm(H)×200mm(D)以下 (結果) 165mm(W)×254mm(H)×197mm(D)	○
重量 (25A)	(目標値) 4.0kg 以下 (25A) (結果) 4.5kg	△
温泉水温度	(目標値) 100℃以下 (結果)100℃以上	○
流量測定能力	(目標値) 範囲 10～100L/min (結果)範囲 10～100L/min 以上	○
温度測定能力	(目標値) 範囲 0～100℃, 分解能 0.1℃ (結果) -200～400℃, 分解能 0.1℃	○
電気伝導率	(目標値) 0.01mS/cm (結果) 分解能 0.01mS/cm	○
プラグインセンサ	(目標値) 水位計, Cl 濃度センサ, 水温計, 圧力センサを接続可能 (結果) 1～5V 入力, 4～20mA 入力にて対応	○
サンプリングレート	(目標値) 1sample/min (結果) 1sample/min	○
データ通信	(目標値) 3G 回線, LTE 回線, ISDN 回線, NTT 光回線を使ったデータ転送が可能 (結果) ルータを用いて 3G/LTE 回線を使用可能	○
配管インターフェイス	(目標値) 温泉値で用いられている代表的な複数種類の配管への接続が可能 (結果) 25A, 50A, 80A の配管に対応可能	○



図Ⅲ(3.3)-3 製作した実用モデル

⑥自立電源のFS

- * 温度差発電について検討し、PV(太陽電池)との経済性評価と実験を実施し、販売価格は PV と同等以下になる予測を示した。
- * 発電量においては、1つの発電ユニットあたり、1.6W（70℃の温度差）の発電を実現し、2つのユニットを用いて実用試験器（2.5W）を12時間以上連続（実験時間）で動作させることに成功した。



図Ⅲ(3.3)4 . 連続運転実験の結果
(温度差発電ユニットは、1.5個分の発電ユニットを使用)

⑦開発推進委員会の開催

- * 開発推進委員会を計8回開催した

⑧まとめ

- * 本システムに今後必要となる改良点等を取りまとめた。
- * 価格低減のための取り組みについて検討した。

地熱発電や温泉保護市場の立ち上がりとともに、量産のための投資を実施して、投資回収が完了した時点の価格として、20万円の販売価格を想定した。これらを実現するためには、各ステージでの事業判断や設備投資判断が承認されることが前提条件である。また価格低減として生産技術や設備投資によるコストダウン要素を提示した。

- * 市場調査等を通じて導入拡大へ向けた取り組みを検討した。

導入拡大へ向けては、IoT技術、AI技術等を取り込んだ地域密着課題解決型クラウドシステムの開発を実施し、知名度の高い温泉地域にこのシステムを導入することで、温泉モニタリングの導入を促進していくことから始めるのが良いと判断した。また、これらのシステムを全国展開していくことで、日本の地熱資源を統合的に把握したシステムが構築できると考える。このようなシステムは、地域への課題解決や地熱利用促進だけでなく、地熱発電の合意形成にも大きな役割を果たすものとする。

表Ⅲ(3.3)-3 特許、論文、外部発表等の件数

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表		
	国内	外国	PCT※ 出願	査読 付き	その他	学会発表・ 講演	新聞・雑誌等 への掲載	その他
H26FY	0件	0件	0件	0件	0件	0件	0件	0件
H27FY	0件	0件	0件	0件	0件	2件	0件	0件
H28FY	1件	0件	0件	0件	1件	1件	0件	0件
H29FY	0件	0件	0件	0件	0件	3件	3件	3件

(※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約)

[最終目標に対する成果と達成度]

表Ⅲ(3.3)-4 最終目標に対する成果と達成度

開発項目	開発目標	成果	達成度
①プロトタイプ の設計	実証試験に使用可能な プロトタイプを設計す る	当初予定していたスペックを有するプロ トタイプを設計した	○
②プロトタイプ の試作	実証試験に使用可能な 小型化したプロトタイ プを試作する	従来品の計測器を個別に組み合わせたも のに比べ、長さで 1/5, 重量で 1/10 程度 小型化し, 事業終了時におけるモニタリ ング装置の仕様・性能目標を有するプロ トタイプを試作した	○
③プロトタイプ の改良	プロトタイプを改良 し, 実証試験に使用可 能な性能を持たせる	必要な改良を施し実証試験に使用可能な プロト対応を実現した	○
④実証試験	泉質の異なる複数の温 泉地でデータを取得す るとともにデータの信 頼性, 実用性能等につ いて評価する	温泉地で実データを収集するとともに, プロトタイプの現地での性能を評価した	○
⑤実用モデル設 計, 試作	製品時の基本的な構 成・構造を実現する	製品時の基本構成の構想に基づいた設 計・製作を終了した	○
⑥自立電源の FS	温度差発電と PV につ いて, 経済性を評価す る	温度差発電と PV について, 発電量, 経済 性を評価した	○
⑦まとめ	本装置の実用化時の製 造コストならびにコス ト低減のための手法を 取りまとめる	本装置の実用化時の製造コストならびにコ スト低減のための手法を取りまとめた	○

IV. 実用化に向けての見通し及び取り組みについて

- * 本事業の最終的な成果物のひとつである、「温泉モニタリング装置実用モデル」は、製品時の基本的な構成・構造を実現しており、横河電機株式会社は2019年度にも本装置とクラウドサービスを販売開始する計画を立案しつつある。
- * 市場調査の結果、本装置の主なマーケットとして、(a)地熱発電と温泉の共生に関する分野、および、(b)温泉資源の適正利用に関する分野の2つがあることが示されている。このうち、(b)に関連した「自治体等が集中管理する温泉」が初期のテストマーケットとして最も有望であり、これらへの設置実績をベースに普及拡大を図るのが望ましいと考えている。また、地熱発電と温泉の共生に関する分野への展開については地熱開発ディベロッパー等と連携し、着実に導入を進め、本装置の有用性を示していくことが重要である。
- * 市場調査の結果、取得したデータの分析・解析サービスに関する要望もあることが判明しており、AI-IoT技術を導入した温泉変動の解析、温泉水/熱エネルギーの最適利用等に関するサービスもビジネスとして成立する可能性が高いと判断している。

個別テーマ(3.4)

(3)発電所の環境保全対策技術開発

(3.4)エコロジカル・ランドスケープデザイン手法を活用した設計支援ツールの開発

委託研究先: 清水建設、風景デザイン研究所、法政大学

II. 研究開発マネジメントについて(事業の計画内容)

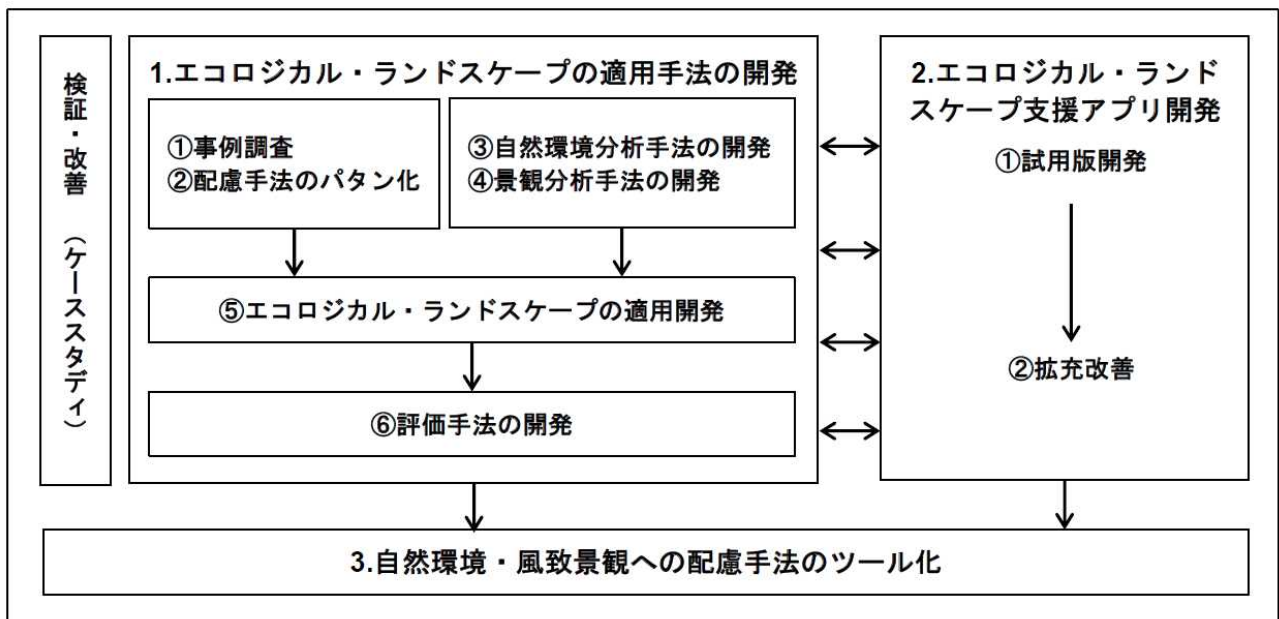
(3.4.1)背景と目的

現在、我が国のエネルギー政策では、安定的な発電の見込める再生エネルギーの確保の観点から、地熱発電が期待されている。平成24年3月27日には環境省から通知が出され、国立・国定公園内の第2種特別地域及び第3種特別地域でも、特段の取り組みをする場合には地熱開発ができることとなった。この通知では、特段の取り組みの要件として5項目が挙げられているが、そのうちの1項目に「自然環境、風致景観及び公園利用への影響を最小限にとどめるための技術や手法の投入」が挙げられており、現在その技術や手法についてどのように考えればよいか課題となっている。

本研究開発では、自然環境に配慮してデザインするための設計手法である「エコロジカル・ランドスケープ」を活用することにより、地域の自然環境や風致景観に配慮した地熱発電の開発計画を推進するためのデザイン手法を開発すると共に、その設計支援ツールを開発することを研究開発目標とする。これにより事業者が適用可能な地熱発電の自然環境、風致景観への配慮手法が明確化され、地熱発電開発の合意形成、地熱発電開発の促進に寄与することを目的とする。

(3.4.2)研究開発の概要

本研究開発では、地熱発電開発でのエコロジカル・ランドスケープの適用手法と、その適用の際に必要な支援アプリを開発する。事業項目とフローを図II(3.4)-1に示す。本図に示すように、本研究開発には「①エコロジカル・ランドスケープの適用手法の開発」と「②エコロジカル・ランドスケープ支援アプリ開発」の2つの方向性があり、この2つをまとめる形で「③自然環境・風致景観への配慮手法のツール化」を行う。それぞれの概要を下記に示す。



図II(3.4)-1 研究開発の項目とフロー

①エコロジカル・ランドスケープの適用手法の開発

1)事例調査

国内外の地熱発電所10数カ所について、現地調査や文献による調査を実施する。

2)配慮手法のパタン化

調査を実施したそれぞれの発電所で実施されている自然環境・風致景観配慮手法を、エコロジカル・ランドスケープの観点からパタン化する。

3)自然環境分析手法の開発

環境影響評価等で実施される自然環境調査(動物・植物、生態系調査等)の結果に基づき、自然環境の観点での保全重要度を可視化するための分析手法を開発する。

4)景観分析手法の開発

現地調査及びコンピュータ・シミュレーションに基づく可視不可視分析を実施し、その結果に基づき、景観配慮で重要となる主要視点場を特定するための手順を明確化する。そして、その視点場からの風致景観に配慮検討で活用するための、発電所の見え方等についてシミュレーションする「景観分析手法」を開発する。

5)エコロジカル・ランドスケープの適用開発

エコロジカル・ランドスケープを適用した場合と適用しない場合の双方について、地熱発電の施設配置計画のケーススタディを実施し、自然環境、風致景観に配慮した地熱発電開発のプロセスや配慮のイメージを具体化する。

6)評価手法の開発

「①エコロジカル・ランドスケープの適用手法の開発」の「1)事例調査」の結果に基づき、自然環境、風致景観への影響がどの程度であれば、一般的に許容範囲として認識されるのか、事例ごとにその評価手法について検討する。

②エコロジカル・ランドスケープ支援アプリ開発

1)試用版開発

エコロジカル・ランドスケープを活用して開発した「地域の自然環境や景観に配慮した開発計画を推進するデザイン手法」で必要となる設計支援ツールの試用版を開発する。

2)拡充・改善

試用版の支援アプリについてケーススタディを実施することで、実用性を高める。

③自然環境・風致景観への配慮手法のツール化

「①エコロジカル・ランドスケープの適用手法の開発」及び「②エコロジカル・ランドスケープ支援アプリ開発」での検討結果を統合することにより、エコロジカル・ランドスケープ支援アプリを活用した地熱発電開発の自然環境、風致景観への配慮に関するプロセス、イメージを具体化する。

上記の「①エコロジカル・ランドスケープの適用手法の開発」、「②エコロジカル・ランドスケープ支援アプリ開発」、「③自然環境・風致景観への配慮手法のツール化」の研究開発目標とその根拠を表Ⅱ(3.4)・1に示す。

表Ⅱ(3.4)-1 研究開発目標と根拠

事業項目	研究開発目標	目標レベル設定の根拠
①エコロジカル・ランドスケープの適用手法の開発	既存の地熱発電所で実施されている景観構成要素別の自然環境・風致景観配慮手法をパタン化し、地熱開発事業者が活用しやすい成果物(パタン集)として取りまとめる。	パタン化した結果を、地熱開発事業者が活用できるものとするため。
	ケーススタディに適用可能な、自然環境や景観の分析手法(手順、分析内容)を明確化する。	分析手法を明確化にあたって、まず机上で可能な範囲で検討、取りまとめる必要があるため
	ケーススタディの実施により、エコロジカル・ランドスケープの適用手法を明確化する。	実際の地熱発電所開発で適用可能なエコロジカル・ランドスケープの適用手法を明確化する必要があるため。
②エコロジカル・ランドスケープ支援アプリ開発	ケーススタディに適用可能なエコロジカル・ランドスケープ支援アプリの試用版を開発する。	エコロジカル・ランドスケープ支援アプリを開発にあたって、まず机上で可能な範囲で検討、取りまとめる必要があるため。
	エコロジカル・ランドスケープ支援アプリを完成させる。	ケーススタディ実施により、実際の地熱発電所開発でエコロジカル・ランドスケープ支援アプリを開発する必要があるため。
③自然環境・風致景観への配慮手法のツール化	一連の配慮手法をマニュアル化することで「ツール化」する。	研究開発の成果を、実際の地熱発電所開発で適用可能なツールとして取りまとめることで専門知識のない開発事業者もエコロジカル・ランドスケープを利用できるようにするため。

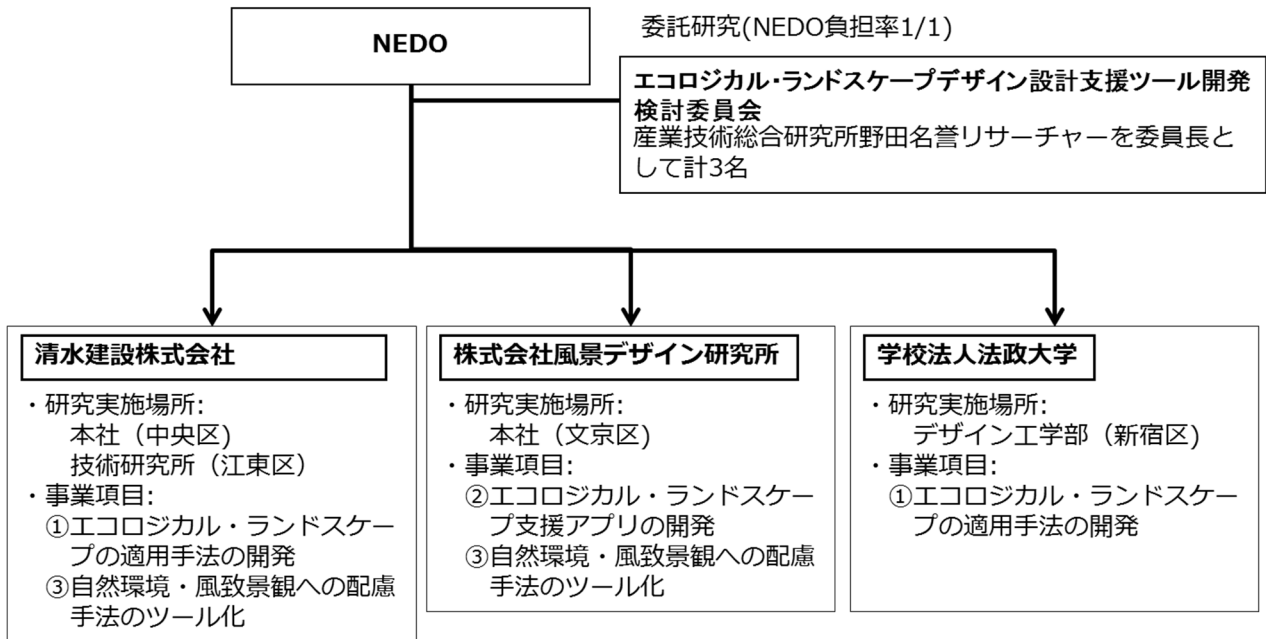
(3.4.3)事業スケジュール

本研究開発の事業期間は、平成26年12月25日から平成30年2月28日までである。主な事業スケジュールの概要を図Ⅱ(3.4)-2に示す。平成26年度から平成29年度にかけて、「①-1事例調査」、「①-2配慮手法のパタン化」、「①-3自然環境分析手法の開発」、「①-4景観分析手法の開発」、「①-5エコロジカル・ランドスケープの適用開発」、「②-1アプリ開発：試用版開発」、「②-2アプリ開発：拡充改善」を実施し、H29年度に「③自然環境・風致景観への配慮手法のツール化を行った。委員会は延べ6回実施した。

研究開発項目	26年度				27年度				28年度(予定)				29年度(予定)			
	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q
①エコロジカル・ランドスケープの適用手法の開発					事例調査											
					配慮手法のパタン化											
					自然環境分析手法の開発											
					景観分析手法の開発											
					エコロジカル・ランドスケープの適用開発											
									評価手法の開発							
②エコロジカル・ランドスケープ支援アプリ開発					試用版開発											
									拡充改善							
③自然環境・風致景観への配慮手法のツール化													マニュアル化			

図Ⅱ(3.4)-2 研究開発のスケジュール

(3.4.4)研究開発の実施体制



(3.4.5)研究開発の運営管理

表Ⅱ(3.4)-2 エコロジカル・ランドスケープデザイン手法を活用した設計支援ツールの開発 アドバイザー検討委員会

清水建設株式会社
株式会社風景デザイン研究所
学校法人法政大学

担当	氏名 (敬称略)	所属
委員長	野田 徹郎	国立研究開発法人産業技術総合研究所 名誉リサーチャー
委員	斎藤 馨	東京大学大学院 新領域創成科学研究科 教授
委員	安達 正敏	国際石油開発帝石株式会社 経営企画本部事業企画ユニット シニアコーディネーター

所属は、委員会組織時点のもの

Ⅲ. 研究開発成果について

「1. エコロジカル・ランドスケープの適用手法の開発」では、まず国内外の地熱発電所を調査し、ランドスケープ・アーキテクトの関与状況、自然環境と風致景観への配慮手法を把握した。次に事業者ヒアリング、有識者委員会で得られた意見を踏まえ、エコロジカル・ランドスケープの観点から、自然環境や景観の分析、地熱発電所の計画の手法・プロセスを明確化した。なお、これらの手法やプロセスはケーススタディを実施することで、より実用性や汎用性の高いものとなるよう留意した。

「2. 評価手法の開発」では、景観への影響に関する来訪者の評価傾向を実験により計測し、エコロジカル・ランドスケープデザイン手法の適用による景観への影響低減の程度を明らかにした。これにより、景観上重視すべき視点の位置や数、景観影響が小さいと感じられる地熱発電所計画の方向性等を把握できるように配慮した。

「3. エコロジカル・ランドスケープ支援アプリ開発」では、明確化したプロセスの作業をサポートするアプリケーションを開発した。既存のアプリケーションでは、可視域の推定は地形情報のみに基づくものであったが、現地の樹木の存在が考慮されていないため、実際の可視域と大きく異なることがあった。本アプリケーションは、公開情報のみで現地の樹木情報も考慮に入れた可視域の推定を可能なヴァーチャル・リアリティアプリケーションとした。また、眺望点からの発電所の見え方、発電所からの周辺の見え方のシミュレーションも可能とすることで、机上で概略の景観把握を可能とした（図Ⅲ(3.4)-1）。

上記1で明らかとなった配慮事項は、エコロジカル・ランドスケープの観点から整理し、優良事例を形成するための参考資料「配慮手法パタン参考集」（図Ⅲ(3.4)-2）として取りまとめた。また、自然環境や景観の分析、地熱発電所の計画の手法・プロセスは「自然環境・風致景観配慮マニュアル」（図Ⅲ(3.4)-2）としてまとめることで、優良事例形成に寄与するツール化を図った。



図Ⅲ(3.4)-1 開発したアプリケーションにより作成した発電所の見え方をシミュレーションした図



図 III (3.4)-2 配慮手法パターン参考集

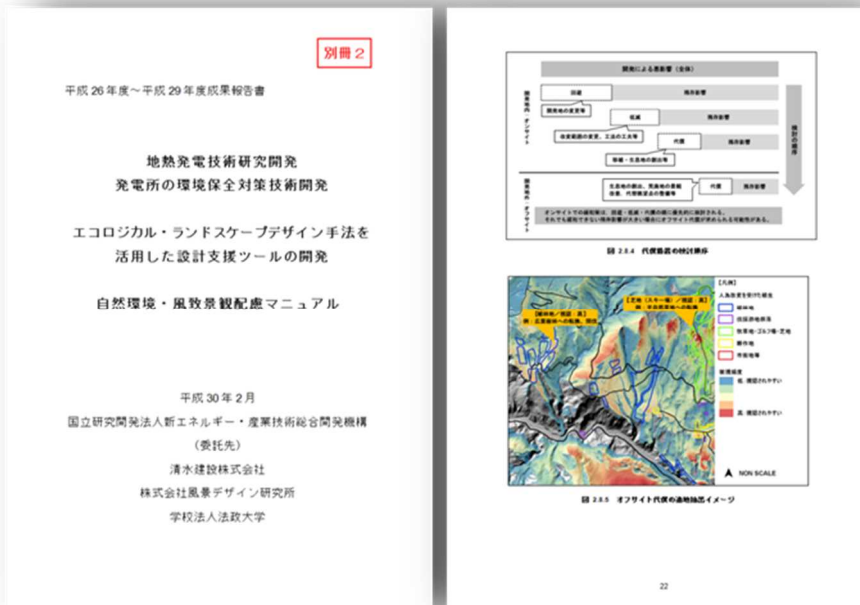


図 III (3.4)-3 自然環境・風致景観配慮マニュアル

表Ⅲ(3.4)-1 特許、論文、外部発表等

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表		
	国内	外国	PCT*出願	査読 付き	その他	学会発表・ 講演	新聞・雑誌 等への掲載	その他
H25FY	0件	0件	0件	0件	0件	0件	0件	0件
H26FY	0件	0件	0件	0件	0件	0件	0件	0件
H27FY	0件	0件	0件	0件	0件	2件	0件	3件
H28FY	1件	0件	0件	0件	0件	2件	0件	0件
H29FY	0件	0件	0件	0件	0件	1件	0件	1件

(※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約)

[最終目標に対する成果と達成度]

表Ⅲ(3.4)-2 最終目標に対する成果と達成度

事業項目	最終目標 (平成 29 年度末)	成果	達成度	目標達成のために解決すべき課題
①エコロジカル・ランドスケープの適用手法の開発	既存の地熱発電所で実施されている景観構成要素別の自然環境・風致景観配慮手法をパターン化し、地熱開発事業者が活用しやすい成果物(パターン集)として取りまとめる。	景観構成要素別の自然環境・風致景観配慮手法をパターン化した「配慮手法パターン参考集」を作成した。	○ (達成)	
	ケーススタディに適用可能な、自然環境や景観の分析手法(手順、分析内容)を明確化する。	自然環境や景観の分析手法を明確化し、ケーススタディを実施。適用手法を明確化した。	○ (達成)	
	ケーススタディの実施により、エコロジカル・ランドスケープの適用手法を明確化する。			
②エコロジカル・ランドスケープ支援アプリ開発	ケーススタディに適用可能なエコロジカル・ランドスケープ支援アプリの試用版を開発する。	①で明確化したプロセスの作業を支援するアプリケーションを、一部機能を除き開発した。	△ (一部未達成)	発電所建設に係る基本計画段階に必要な1/2500精度(5mメッシュの等高線地形図)の表示を可能にする等の機能改善の必要がある。
	エコロジカル・ランドスケープ支援アプリを完成させる。			
③自然環境・風致景観への配慮手法のツール化	一連の配慮手法をマニュアル化することで「ツール化」する。	①で明確化したプロセスの調査・分析、計画を実施するためのマニュアル「自然環境・風致景観配慮マニュアル」を作成した。	○ (達成)	

IV. 実用化に向けての見通し及び取り組みについて

本研究で開発した支援アプリについては、当初想定した造成土量の算出等の機能は未達成だが、樹木情報も考慮に入れた可視域の推定や、眺望点からの発電所の見え方、発電所からの周辺の見え方のシミュレーション等の機能は、検証作業により、達成したことを確認した。今後は、実際の地熱発電所開発のための調査・分析、計画業務を地熱発電事業所より受託し、本アプリケーションを適用し、ブラッシュアップを進める。それを複数の事業について実施した後、本アプリケーションの販売に向けて各種の準備を進める。

エコロジカル・ランドスケープの適用手法については、そのプロセスを明確化し、自然環境と風致景観への配慮手法を「配慮手法パタン参考集」として、自然環境や景観の調査・分析、地熱発電所の計画の手法・プロセスを「自然環境・風致景観配慮マニュアル」として取りまとめた。今後は当該マニュアルをアピールしつつ、実際の地熱開発に適用し、プロセスの最適化を図っていく。

個別テーマ(3.5)

(3) 発電所の環境保全対策等技術開発

(3.5) シード循環法によるシリカスケール防止技術の研究開発

委託先 国立大学法人富山大学、国立大学法人九州大学、三菱マテリアルテクノ株式会社

II. 研究開発マネジメントについて（事業の計画内容）

(3.5.1) 背景と目的

既存の地熱発電所での大きな問題としてシリカスケールがある。地熱流体を地表で蒸気と熱水に分離した際にシリカ成分(SiO_2)が熱水中に濃縮されることにより、また、貯留層内では 250～300℃であった地熱流体が地表で 100℃程度まで低下して熱水中のシリカ溶解度が下がることで、シリカが過飽和となり、非晶質のシリカスケールが生成する。シリカスケールは地上配管や還元井及びその周辺の地層に沈殿して目詰まりを起し、熱水還元量の低下を引き起こしている。シリカスケールの防止策としては、硫酸を添加して熱水の pH を中性から酸性側へ処理する pH 調整法や、150℃程度で地下へ還元する高温還元法などが行われている。このうち、pH 調整法は、硫酸を添加した還元熱水が再び地熱貯留層や生産井に戻った際に、岩石と反応して硬石膏(CaSO_4)がスケールとして沈殿する問題が起こっている。また、高温還元法では、回収できる熱エネルギーの一部をそのまま地下へ戻していることから、例えば、50MW クラスの地熱発電において、100℃の大気圧まで熱利用した場合と比べて、150℃の高温還元法では 8MW の発電量をロスしていると試算される。そこで本研究では、地熱発電所におけるシリカスケール問題を解決し、発電量向上に寄与することを目的に、シード循環法により熱水中の過飽和シリカを除去する技術の開発を行う。

本研究開発の目的は、地熱発電所におけるシリカスケール問題を解決し、発電量向上に寄与することを目的に、シード循環法により熱水中の過飽和シリカを除去する技術の開発を行う。

(3.5.2) 研究開発の概要

本研究開発では、地熱貯留層への環境負荷の少ないシリカスケール防止方法として、少量の凝集剤を添加したシード循環法による過飽和分シリカ除去法の開発を行った。特に、アルミニウムがシリカ沈殿を促進していることから、シリカとアルミニウム成分との室内試験による反応メカニズム解明の成果を反映させて、金属イオンを含まないカチオン系凝集剤による現場試験を中心とした実験を行った。これにより、従来よりもさらにシリカ除去効率の良い凝集剤の選定を行い、少量の薬剤（凝集剤や生石灰）により効率的にアルミニウムを取り込んだシリカ回収を可能にする条件を探り、本手法の実用化に向けた検討を行った。

本研究では、シリカ除去装置として、実証試験用処理プラント（1トン/時）を製作し、地熱発

電所の熱水を用いてシリカ除去試験を実施した。また、処理した熱水が、地下へ還元された際にどのような水質変化が起こるかを予測し、地熱貯留層の環境変化を評価し、新たなスケール問題が発生するかどうかの検討を行った。

なお、熱水中のシリカの挙動は、シリカ濃度によって大きく異なる（モノマーの重合速度が大きく異なる）ことが知られており、高シリカ濃度熱水は、気液分離直後から、モノマーシリカが互いに重合してポリマーシリカへ変化し、その重合速度は、約15分間で遅くなることが知られている。一方、低シリカ濃度熱水は重合速度が遅く、ポリマーシリカの形成に時間がかかることが知られている。今回適用する凝集剤は、主としてポリマーシリカに反応するものであり、本研究では、高シリカ濃度熱（1,000mg/L）と低シリカ濃度熱水（600mg/L）の2種類の熱水を対象に試験を行い、それぞれのシリカ濃度に適した熱水処理技術の検討を行った。

本研究開発は、シリカスケールの原因である熱水中の過飽和シリカ分を除去する技術を開発することであり、5つのテーマについて開発を行った。

各テーマの開発項目と目標を表Ⅱ(3.5)-1に示す。

表Ⅱ(3.5)-1 事業目標と目標レベル設定の根拠

事業項目	開発目標	目標レベル設定の根拠
①効率的なアルミニウムを取り込んだシリカ除去方法の開発	シリカとアルミニウムを同時に除去する	アルミニウムがシリカスケール生成の原因である
②シード循環法を用いた試験用プラントの設計・製作	効率的な過飽和シリカを除去する試験用プラント（1トン/時）の設計・製作	過去の試験プラント（1L/分）によるシリカ除去試験結果をもとに改良
③試験用プラントを用いた連続シリカ除去試験	凝集剤・生石灰添加による連続試験で最適な除去条件を求める	現地熱水を用いたビーカー試験結果から循環試験条件を設定
④シリカ除去後の熱水が地熱貯留層へ及ぼす影響の評価	処理熱水が地下へ還元された際に地下環境へ及ぼす影響評価を把握	過去のカラム通水試験や岩石-水反応試験と水質変化予測を適用
⑤実用化プラント設計・コスト評価	実用化レベルの熱水処理プラントの設計	現地試験によるシリカ除去循環試験結果などを反映

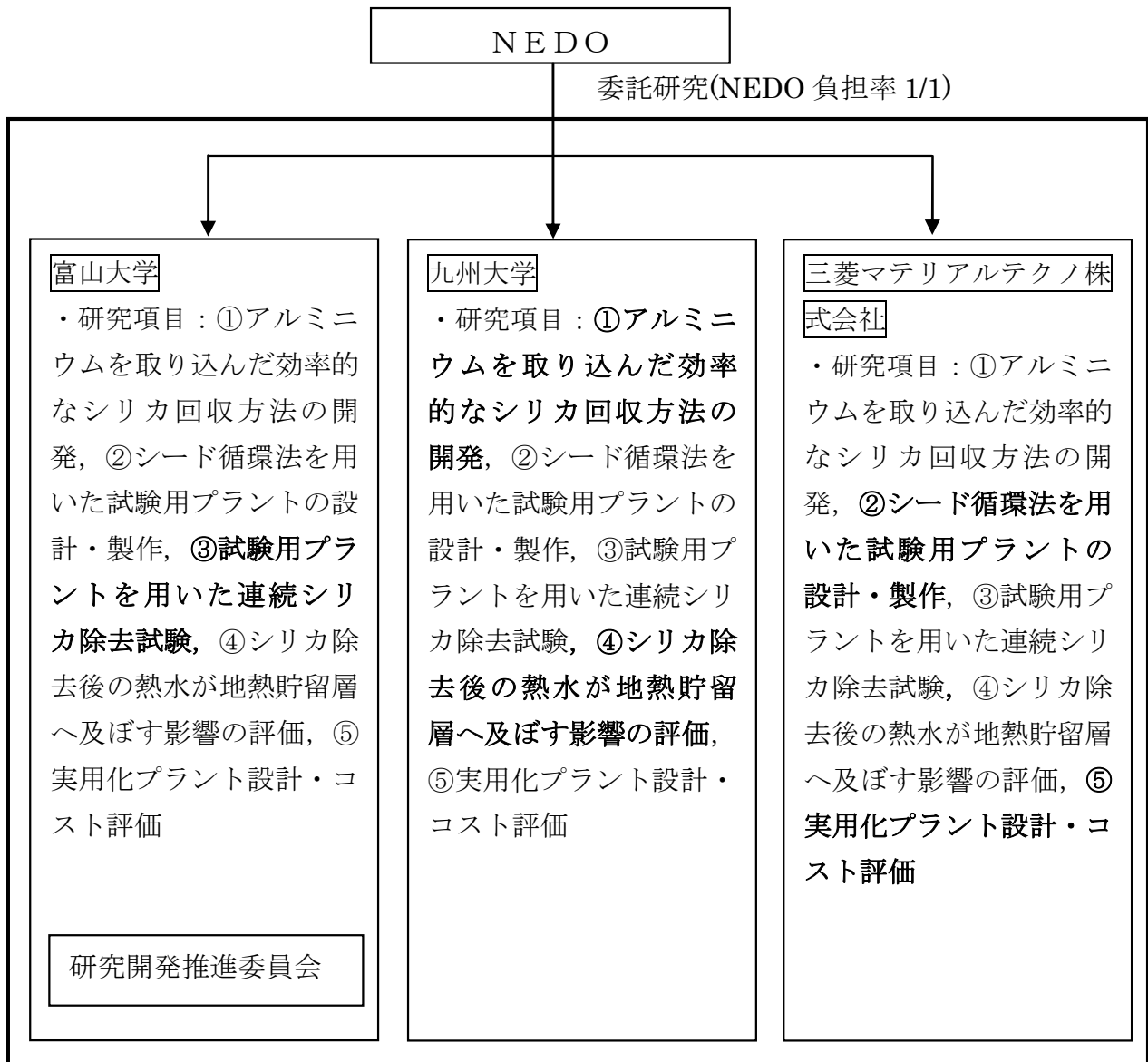
(3.5.3) 事業スケジュール

本研究は、平成27年度から29年度までの3か年にわたり実施された。各研究開発項目のスケジュールを図II(3.5)-1に示す。

事業項目	27年度				28年度				29年度			
	第1. 四半期	第2. 四半期	第3. 四半期	第4. 四半期	第1. 四半期	第2. 四半期	第3. 四半期	第4. 四半期	第1. 四半期	第2. 四半期	第3. 四半期	第4. 四半期
① アルミニウムを取り込んだ効率的なシリカ回収方法の開発			海上	海上	海上	海上	海上	海上	海上	海上	海上	海上
② シード循環法を用いた試験用プラントの設計・製作			試験プラント設計	試験プラント設計	試験プラント設計	試験プラント設計	試験プラント設計	試験プラント設計	試験プラント設計	試験プラント設計	試験プラント設計	試験プラント設計
③ 試験用プラントを用いた連続シリカ除去試験			試験条件検討	試験条件検討	試験条件検討	試験条件検討	試験条件検討	試験条件検討	試験条件検討	試験条件検討	試験条件検討	試験条件検討
④ シリカ除去後の熱水が地熱貯留層へ及ぼす影響の評価			岩石調整	岩石調整	岩石調整	岩石調整	岩石調整	岩石調整	岩石調整	岩石調整	岩石調整	岩石調整
⑤ 実用化プラント設計・コスト評価			事前FS	事前FS	事業性FS	事業性FS	事業性FS	事業性FS	事業性FS	事業性FS	事業性FS	事業性FS
研究開発推進委員会の開催												

図II(3.5)-1 研究開発のスケジュール

(3.5.4) 研究開発の実施体制



(3.5.5) 事業の管理運営

表Ⅱ(3.5)-2 技術推進委員会

氏名	所属・役職	委嘱期間
竹中 照雄	出光大分地熱株式会社 社長 (委員長)	H28/2～H30/2
有木 和春	三菱マテリアル株式会社 環境・エネルギー事業本部 エネルギー事業部 事業部長補佐	H28/2～H30/2
藤本 顕治	九州電力株式会社 エネルギーサービス事業統括本部 火力発電本部 地熱運営グループ長	H28/2～H29/5
本山 達也	九州電力株式会社 エネルギーサービス事業統括本部 火力発電本部 地熱運営グループ長	H29/6～H30/2
石崎 潤一	東北電力株式会社 火力原子力本部 火力部 地熱統括センター 所長	H28/2～H28/5 H29/6～H30/2
山野辺 宏	東北電力株式会社 火力原子力本部 火力部 地熱統括センター 所長	H28/6～H29/5
島田 寛一	西日本技術開発株式会社 地熱部 部長	H27/2～H30/2

Ⅲ. 研究開発成果について

Ⅲ-1 研究開発成果

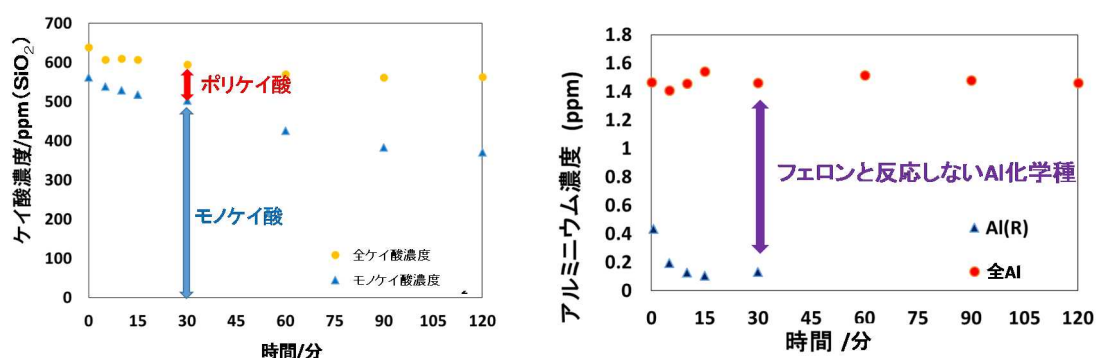
本研究開発の最終目標は、地熱発電所の熱水中のシリカスケールを完全に防止することである。熱水中のシリカは、気液分離や温度低下のため、地上では過飽和となりシリカスケールとして沈殿するため、地熱発電所運転の障害となっている。このため、過飽和シリカを薬剤添加して除去するシード循環法を検討し、地上配管や還元井及びその周辺地層に沈殿するスケール沈殿をなくすことを目指した。この際、シリカスケールの原因となっているアルミニウムもシリカと同時に除去する条件を探るほか、処理した熱水が地熱貯留層へ還元された際の水質変化の実験的理論的予測を行った。これらの試験は、滝上・澄川・山川発電所の熱水を用いたビーカー試験及び連続シリカ除去試験で検討を行った。これらの結果から、シリカ除去の実用化プラントの装置の概念設計やコスト試算を行い、本手法の利点と課題を抽出することを本開発で行った。

(1) アルミニウムを取り込んだ効率的なシリカ除去方法の開発

熱水にいくつかのカチオン系凝集剤を添加し、処理熱水中のシリカ濃度変化について検討を行った。さらに、ケイ酸の重合過程における熱水中のアルミニウムとケイ酸との反応について検討を行った。その結果、有機アンモニウムである CTAB と DADMAC が高いシリカ凝集沈殿能をもつことを確認した。また、地熱熱水中でケイ酸が重合するにつれてアルミニウムがポリケイ酸に取り込まれることを確認した。ケイ酸の重合時間が長いほど、凝集

剤添加によるケイ酸およびアルミニウムの沈殿率が高いことが判明した。DADMAC は 30 分の重合時間の時に最も沈殿効率が高く、沈殿させるのに適したポリケイ酸サイズがある可能性が示唆された。

シリカスケールの原因の1つとなるアルミニウム (Al (R)) をシリカと共に沈殿させる試験では、図Ⅲ (3.5)-3 に示すように、2 時間の間に全アルミニウム濃度は変化しなかったが、Al (R) の濃度は 30 分ほどで 0mg/L 付近になった。モノケイ酸濃度が、400mg/L に達するまでに 60 分以上かかったことから、Al (R) はモノケイ酸の重合の初期の段階で取り込まれると考えられ、シリカを除去することにより、Al (R) も熱水から除去することができると示された。



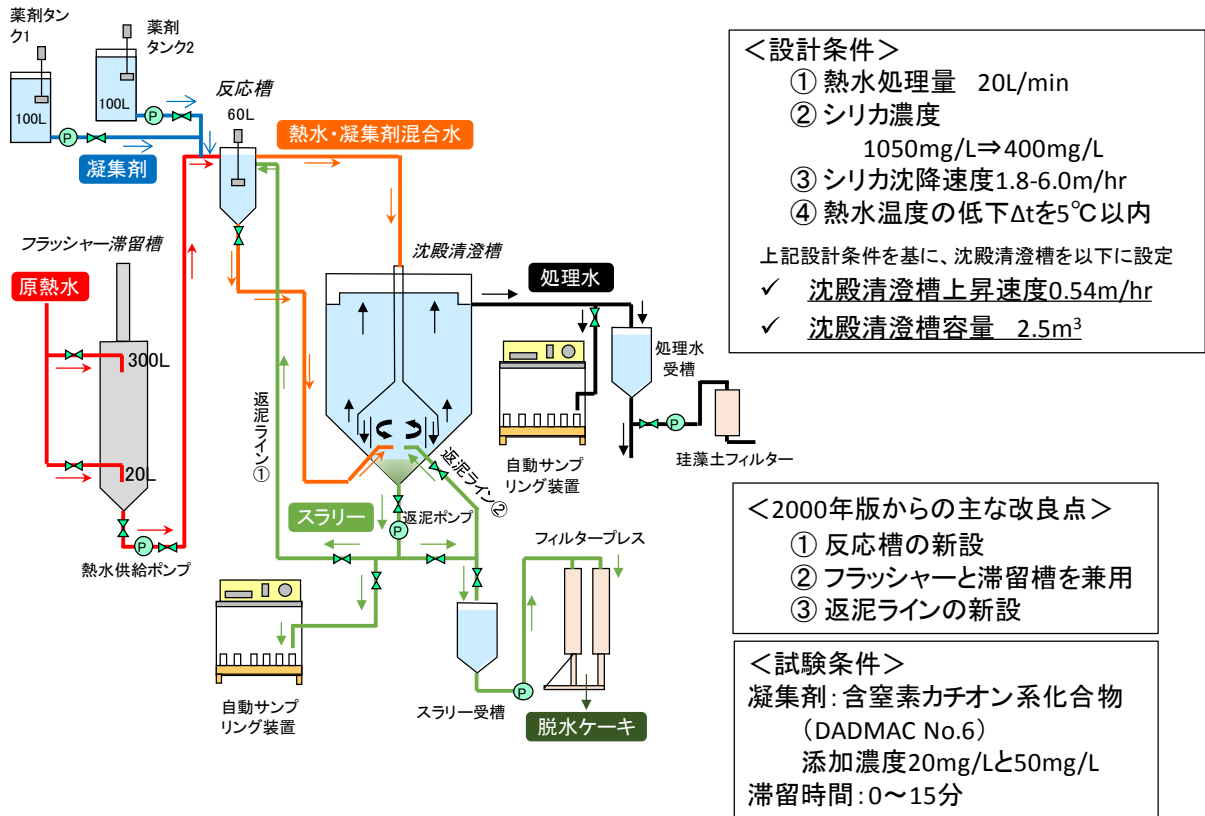
図Ⅲ (3.5)-3 シリカとアルミニウムの共沈 (澄川)

(2) シード循環法を用いた試験用プラントの設計・製作

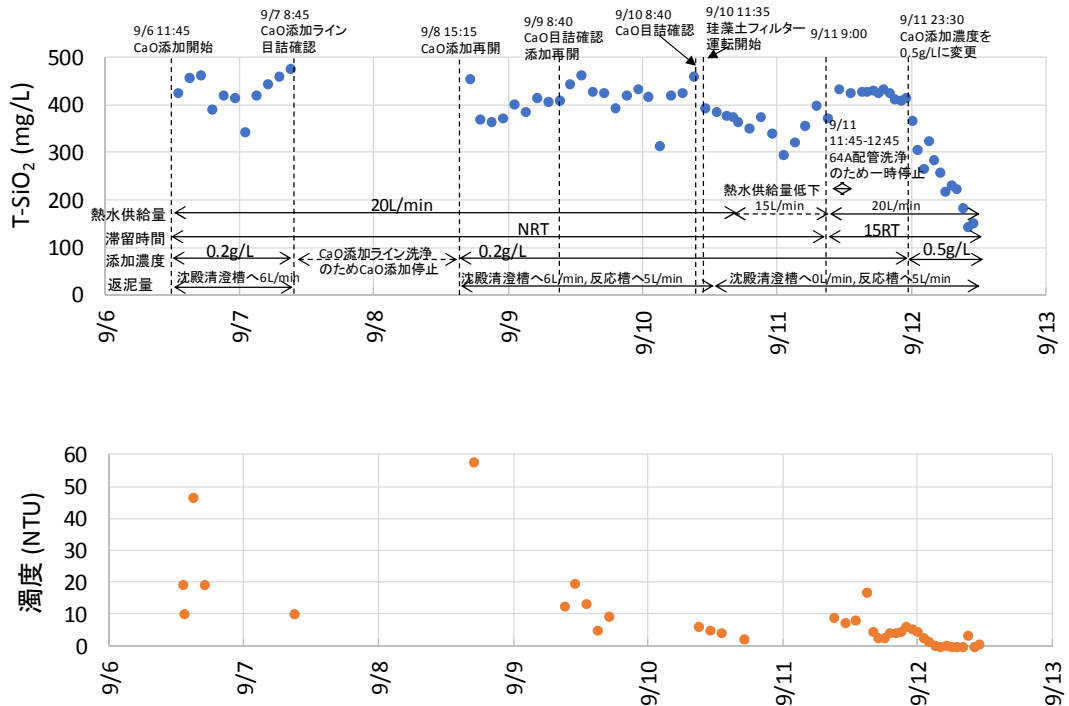
1 トン/時の試験用プラントの設計・製作を行った (図Ⅲ (3.5)-4)。平成 28 年度は、澄川地熱発電所での連続通水試験を行ったが、装置の不具合が発生したため、返泥ポンプの交換、混合槽から沈殿清澄槽への配管のサイズアップ、凝集剤注入方法の変更を行い、追加試験を実施して動作確認を行った。平成 29 年度は返泥ポンプの改良と混合槽から沈殿清澄槽への配管の改造を行い、山川発電所において連続シリカ除去試験実施した。

(3) 試験用プラントを用いた連続シリカ除去試験

平成 28 年度に、澄川地熱発電所で、平成 29 年度に山川発電所で、シード循環装置を用いた連続シリカ除去試験を行った。この 2 箇所の発電所と滝上発電所では、ピーカー試験によるシリカ除去試験も行った。全ての発電所の熱水に対して、カチオン系凝集剤や生石灰 (CaO) は、シリカ濃度を減少させた。連続除去試験では、カチオン系凝集剤を 20mg/L 添加で、シリカ濃度を約 600mg/L まで低減することができた。また塩濃度が高い山川熱水では、添加量が少量ですむことが判明した。生石灰添加試験では、処理水のシリカ濃度は 100mg/L 以下まで低下し、本手法が有効であることが判明した (図Ⅲ (3.5)-5)。



図Ⅲ(3.5)-4 連続シリカ除去試験に用いたシード循環装置

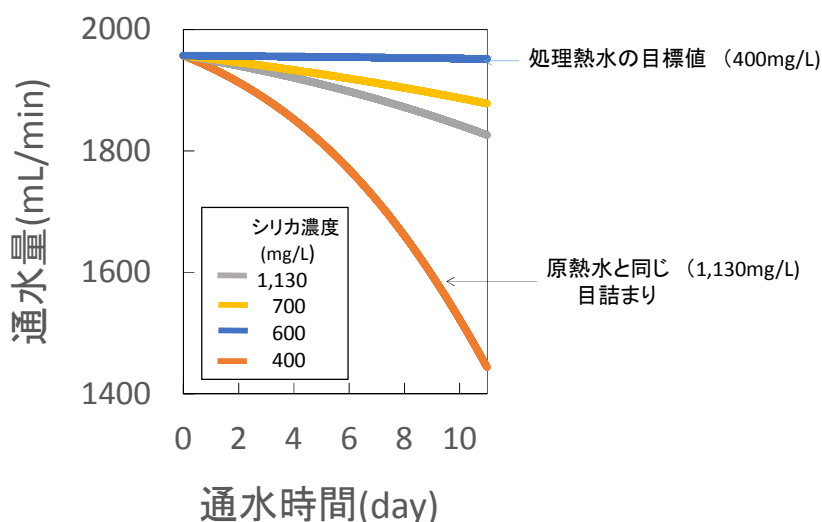


図Ⅲ(3.5)-5 山川発電所熱水を用いた CaO 添加連続循環試験結果

(4) シリカ除去後の熱水が地熱貯留層へ及ぼす影響の評価

シード循環法により処理された熱水が還元井を通して地下へ還元した際に、地層の透水性がどのように変化するかを、現地でのカラム通水試験とその結果から得られたデータをもとにした透水性変化予測シミュレーションを行った（図Ⅲ(3.5)-6）。その結果、澄川の例では、原熱水（ SiO_2 濃度は、1,100mg/L）では、短期間にシリカが沈殿して目詰まりを起こし、透水性が急激に減少するが、処理熱水の目標値である 400mg/L では、ほとんど減衰しないことが予測された。

還元された処理熱水の地熱貯留層内での水質変化のシミュレーションでは、無処理の高濃度シリカ熱水は還元井周辺で多量のシリカを沈殿し、熱水中シリカはクリストバライトの溶解度に規制されていることが初めて判明した。



図Ⅲ(3.5)-6 熱水中のシリカ濃度の違いによる還元井周辺地層の透水性変化予測結果

(5) 実用化プラント設計・コスト評価

150 トン/時の熱水を処理可能なシード循環装置（実用化プラント）の設計および建設費を算定し、操業に必要な年間維持費を試算した。加えて、実際に操業している澄川地熱発電所の事例と比較するために 800 トン/時の熱水を処理するシード循環装置での年間維持費を試算した。また、スケール対策としてこれまで発生した費用（還元井掘削工事費など）と比較し、シード循環装置導入に伴う効果を算定した。その結果、薬剤費及び回収シリカの処分費用のコストが高額となり、これまでのスケール対策費を上回る操業コストが発生することが明らかとなり導入効果を得られない結果となった。これに伴い、コスト削減策を検討したところ、薬剤費および回収シリカ処分費のみのコスト削減では導入効果を得られず、バイナリー発電などの 2 次発電による売電収入によって、発生コストを賄う必要があることが判明した。また、回収されたシリカを 200～300 円/kg の工業品へ加工すること

により、処分費用を高くしている産廃処理費の削減を行うことが示唆された。

表Ⅲ(2.1)-1 特許、論文、外部発表等

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表		
	国内	外国	PCT※ 出願	査読 付き	その 他	学会発表・ 講演	新聞・雑誌 等への掲載	その他
H27FY	0件	0件	0件	0件	0件	0件	0件	0件
H28FY	0件	0件	0件	0件	0件	10件	0件	0件
H29FY	0件	0件	0件	2件	0件	10件	0件	0件

(※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約)

[最終目標に対する成果と達成度]

表Ⅲ(3.5)-3 最終目標に対する成果と達成度

開発項目	開発目標	成果	達成度
①効率的なアルミニウムを取り込んだシリカ除去方法の開発	シリカとアルミニウムを同時に除去する	凝集剤添加によりシリカとアルミニウムを同時除去できた。	○
②シード循環法を用いた試験用プラントの設計・製作	効率的な過飽和シリカを除去する試験用プラントの設計・製作	滞留槽をフラッシャーで兼用する改良を行い、試験プラント製作した。	○
③試験用プラントを用いた連続シリカ除去試験	凝集剤・生石灰添加による連続試験で最適な除去条件を求める	連続除去試験では、カチオン系凝集剤添加によるシリカ濃度低減を確認できた。また塩濃度が高い熱水では、添加量が少量ですむことが判明した。生石灰添加試験では、処理水のシリカ濃度は100mg/L以下まで低下し、本手法が有効であることが判明した ・シリカ除去条件も一部ではあるが把握できた。	△
④シリカ除去後の熱水が地熱貯留層へ及ぼす影響の評価	処理熱水の地下環境へ及ぼす影響評価を把握	処理熱水のカラム通水試験が出来なかったが、地熱貯留層内での透水性変化予測シミュレーションでは、還元水中のシリカの挙動を推測でき	△

⑤実用化プラント設計・コスト評価	実用化レベルの熱水処理プラントの設計	た。 実用プラントを設計し、事業コストを試算できた。回収シリカの産廃処理費が経費の60%を占めると試算され、薬剤費および回収シリカ処分費のみのコスト削減では導入効果を得られないことが判明した。	△
------------------	--------------------	-----------------------------------------------------------------------------------------------------	---

IV. 事業化へ向けての見通しと取組みについて

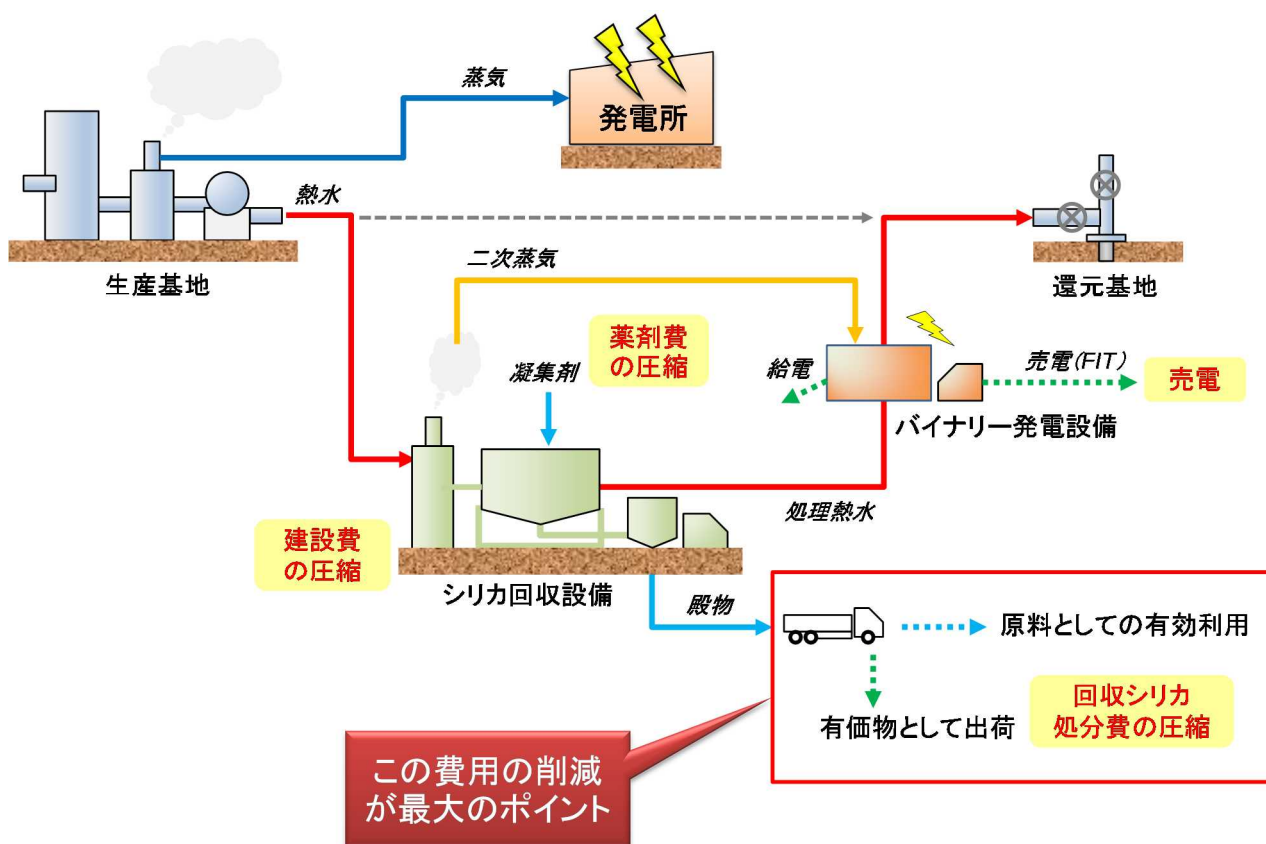
熱水中の過飽和シリカ分を薬剤で回収すれば、還元井でのシリカによる目詰まりは完全に解消され、地熱貯留層では岩石からシリカ鉱物が溶解することが予想されることから、地層の透水性がむしろ上昇することが期待される。しかし、本プロジェクトで判明したように、回収されたシリカの処分費が高く、過飽和シリカ除去法の大きな障害となっている。特に、ヒ素を含む回収シリカを処分するためには、特別管理型産業廃棄物となるため、その処分費は75千円/トンと一般産業廃棄物の30千円/トンと比較して高額である。年間約3,000トンの回収シリカが発生する場合には、その処分費として135百万円/年が必要となる。このことから、薬剤を添加してもヒ素を沈殿させないか、沈殿させたとしても洗浄で除去できる回収法を開発する必要がある。過去のNEDOプロジェクトの結果から、薬剤を添加してもpH9以下ならば、熱水中にヒ素が残存する可能性が高いことが示唆されている。

そこで、今後は、シリカ沈殿物にヒ素などの有害成分を含まないように、あらかじめヒ素を除去する手法の開発を行う必要がある。熱水中のヒ素は亜ヒ酸の状態で存在しているため、これを酸化剤でヒ酸にし、鉄化合物を添加して、共沈させる手法が一般的であるが、酸化剤は還元熱水には利用できない。その理由は、地熱貯留層は還元的条件であり、酸化された還元水が混入すると、硫化物や硫黄が酸化されて硫酸となるため、貯留層流体が酸性化する。このことから、熱水の酸化還元状態を変化させないで、ヒ素を除去する手法として、シュベルトマナイト ($\text{Fe}_8\text{O}_8(\text{OH})_8\text{-}2\text{x}(\text{SO}_4)_\text{x}$ ($1 < \text{X} < 1.75$)) を用いる方法がある。シュベルトマナイトは、休止鉱山の酸性排水中に沈殿している鉱物であり、人工的に鉱山廃水などを用いて合成することが容易である。このシュベルトマナイトを用いた試験は、実際の熱水を用いた試験で検討されており、30分間でヒ素濃度を低減することが出来ている。

シード循環法による過飽和シリカ回収によるスケール防止技術を実用化するためには、回収されたシリカを産廃処理ではなくて、有効な工業品として販売する必要がある(図IV(3.5)-7)。シリカはあらゆる産業分野で広く使用されている資源の1つであることから、この回収シリカを資源化することにより、熱水処理コストの削減が大きく図られることが期待される。例えば、シリカ品の原料として利用されている珪石は、83円/kgで、1万トン/年以上が国内で販売されている。現在まで開発されている熱水処理プラントでの処分費用を計算

すると、シリカの運搬費や処分費は、回収シリカ 1 kg 当たり 350 円必要であることから、この経費を削減できれば、その差額が利益となる。このことから、回収シリカの全部あるいは一部を工業品化することにより、熱水処理コストを低減できれば、最終的には発電所のシリカスケール防止という目標を達成できると期待される。凝集剤添加で回収されたシリカを、スプレドライヤにより球状化し、セメント混和材とする研究例がある（加藤ほか，2003）。このようなヒュームドシリカを発電所で行うことにより、運搬費の削減に大きく寄与することが期待される。シリカ工業品としては他に、ゼオライト製品やメソポーラスシリカがある。法政大学渡邊研究室と物質・材料研究機構の山田研究室（Watanabe et al., 2005, 2013；渡邊ほか，2010）は、そのような研究を進めており、予察試験の結果では、澄川地熱発電所の連続シリカ回収試験で回収されたシリカにアルカリとアルミニウムを少量添加して、150°Cで1日間反応させた場合、ゼオライトの一種であるアナルサイムが合成できることが確認されている。

これらの結果を踏まえて、脱ヒ素条件を確立し、脱ヒ素とシリカの連続処理プラントを設計・製作し、回収されたシリカを発電所内で加工して工業品として製造して運搬するシステムを完成させることにより、熱水処理コストを大幅に削減することができ、シード循環法によるシリカスケール防止技術の実用化実現の可能性が大幅に高まると期待される。



図IV (3.5)-7 実用化プラントのフロー

個別テーマ(3.6)

(3) 発電所の環境保全対策等技術開発

※「(4) 地熱発電の導入拡大に資する革新的技術開発」テーマ

(3.6) 還元熱水高度利用化技術開発（熱水中のスケール誘因物質の高機能材料化による還元井の延命・バイナリー発電の事業リスク低減）

委託先 地熱技術開発株式会社、公立大学法人北九州市立大学、日揮株式会社

II. 研究開発マネジメントについて（事業の計画内容）

(3.6.1) 背景と目的

地熱水に含まれる高濃度シリカによるシリカスケール問題は、地熱発電所還元井の還元能力の低下や、バイナリー発電設備導入時の熱交換効率の低下など、地熱発電所の利用率低下の原因の一つとなっているが、未だ抜本的な解決がなされていない。本研究開発では、地熱水に含まれるシリカをコロイダルシリカとして積極的に回収し、有償化できる品質の製品として市場性を持たせることを目指すとともに、将来的には二次生成物として希少金属であるリチウム等を精製することで、地熱発電事業に新たな付加価値を与えると同時に、地熱発電所における大きな問題の一つである還元井や地上設備へのシリカスケール付着による操業リスクを低減し、さらに地熱水の熱回収によるバイナリー発電を用いた発電量の拡大を可能にすることを目標としている。

(3.6.2) 研究開発の概要

本事業では、地熱水に含まれるシリカを市場価値の高いコロイダルシリカとして回収するシステムを開発・設計する。あわせて地熱水からリチウムを分離するために必要な吸着分離剤、及びリチウム回収システムを開発する。さらに、還元井の延命化、還元熱水を利用したバイナリー発電導入時の事業費低減可能性について検討を行う。

① シリカ回収事業の事業性 FS

シリカ回収事業のビジネスプランの検討を行い、事業性 FS を以下のケースについて行う。

- ・ シリカ回収事業単体の場合
- ・ シリカ回収プロセスとリチウム回収プロセスを統合した場合
- ・ シリカ回収事業に還元井延命化効果を追加した場合
- ・ シリカ回収事業に還元井延命化効果を追加し、さらにバイナリー発電を組み合わせた場合

② シリカ回収プロセスのパイロットプラント設計・製作

プラント設置場所の確保が難しい我が国の地熱発電所の状況を考慮して、試験装置を極力コンパクトに配置すると共に、試験フィールドへの移設を容易にするために複数の 20ft コンテナに収納し、試験フィールドの敷地条件に対応して組み立て・配置する設備とし設計する。そして葛根田地熱発電所内の基地で実証試験を行う。

③ 実規模概念設計

コロイダルシリカ回収設備の実規模概念設計検討の実施に先立ち、仮想の立地場所を想定して、設計に必要な基礎情報を整理し、この情報をもとに予備的概念設計に使用する設計条件を設定する。そして葛根田地熱発電所におけるパイロット装置によるコロイダルシリカ回収試験結果をもとに、1,000ton/日、並びに 5,000ton/日の 2 種類のケースについて予備的概念設計検討を実施する。

④ リチウム回収技術の開発

地熱水から、溶存元素であるリチウムを高選択的に分離濃縮できる吸着剤と分離回収プロセスを開発することを目的として、以下の 4 つの項目について研究を行う。

- ・ 具体的高選択的離回収が可能なりチウム吸着剤の合成および吸着分離特性の評価
- ・ 地熱水からのリチウムの吸着分離の基礎データの取得と最適化
- ・ 地熱水からのリチウムの選択的吸着分離回収用の実験プラントの設計・製作
- ・ 葛根田地熱発電所の地熱水からのリチウム回収プロセスの実証試験

⑤ 地熱井延命効果の検討

地熱発電所へのシリカ回収技術の適用による還元井、地上設備、貯留層におよぼす影響について、シミュレーションにより評価し、還元井の延命化効果を推定する。さらにその費用対効果の検討を行う。

⑥ バイナリー発電導入時の事業費低減

実サイトにて還元熱水を利用してバイナリー発電を導入するケースを想定し、シリカ回収技術を組み合わせることで、シリカスケール付着を抑制し、運営、保守コストが削減されることをシミュレーションにて評価し、そのフィージビリティを確認する。

⑦ シリカ回収事業に向けた調査・検討

回収したシリカは、①コロイダルシリカ、②沈降性シリカ（ホワイトカーボン）、③その他シリカ原料としての回収を視野に入れているため、この 3 つの項目それぞれについての市場調査を行う。また、平成 29 年度実証試験にて回収されたコロイダルシリカの品質評価ならびに用途別の性能評価を行い各用途での参入可能性調査を実施し、2017～2018 年度で精製を行ったコロイダルシリカの基礎分析の結果を踏まえ、市場可能性規模についての考察を行う。そして用途により性能分析を実施する。

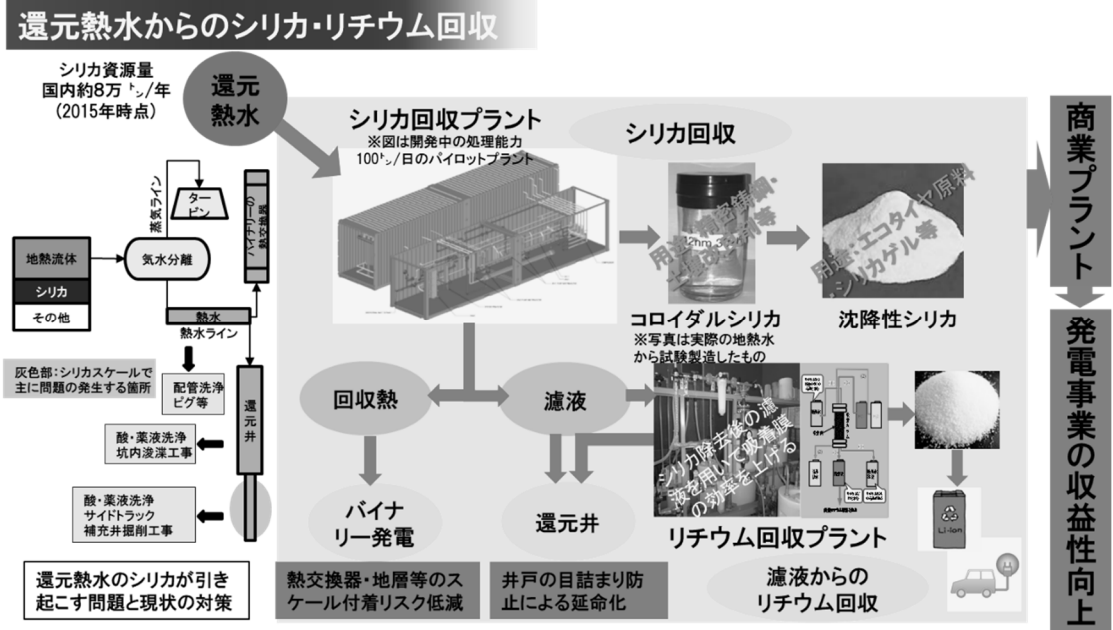


図 II (3.6)-1 プロジェクトの概要

表 II (3.6)-1 研究開発目標と根拠

開発項目		開発目標	設定根拠
シリカ回収事業の事業性 FS		IRR10%(7年)程度を見通せること	一般的投資基準
還元熱水のスケール誘引物質の高機能材料化技術	コロイダルシリカ回収技術の開発		
	基本設計	平地不足・冷却水調達困難・買電単価が高い・還元井分散などの立地条件への対応	他国との立地条件の比較
	パイロットプラントの設計・製作・実証	パイロットプラント(熱水 100t/d)を製作してシリカ濃度 500ppm,1000ppm 程度の熱水で実証を行い、コロイダルシリカ(濃度 20-40%wt,粒径 10-20nm)を実サイトで製造	実用を想定した限外膜の一単位での試験を目指した。製造目標値は国内の還元熱水のシリカ濃度の分布状況、コロイダルシリカの市場品仕様に基づく。
	シリカ回収プロセスとリチウム回収プロセスの共有化の検討	シリカ回収プロセスの濾液をリチウム回収プロセスで用いることで共有化によるコスト低減の可能性を示す。	地熱水でのシリカの共着によるリチウム吸着に対する阻害現象の実例から推定
実規模概念設計検討	地熱コロイダルシリカ回収設備の 1,000トン/日と 5,000トン/日の還元熱水処理量を持つ設備の概念設計の実施	坑井 1 本当り、還元基地に集約する場合で設定	

	リチウム回収技術の開発	地熱水から飽和吸着時点で吸着材容量 1ℓ あたり 20g 吸着可能なリチウム吸着材の開発 地熱水からのリチウムの選択的分離濃縮に必要な吸着分離材・分離回収プロセスの開発と将来の経済的回収への道筋提示	現在までのリチウム吸着剤およびリチウム回収装置の研究開発の実績、並びにシリカ回収との相乗効果の達成のために設定
	還元井延命化効果の推定	還元井寿命を 2 倍以上に延命化可能であること、地熱発電所全体の事業性向上が可能であることを示す。	還元井寿命の実態調査から設定
	バイナリー発電導入時の事業費低減の検討	実サイトでのバイナリー発電導入想定時にシリカ回収との組み合わせによる事業費低減を示す。	実際のバイナリー発電設備の現状を基に推定
	シリカ回収の事業化に向けた調査・検討	国内地熱発電所の状況調査、コロイダルシリカの市場性調査	ニーズ(国内地熱発電所)とシーズ(販売市場)の

(3.6.3) 事業スケジュール

本研究は、平成27年度（平成28年1月）から29年度までの3か年にわたり実施された。各研究開発項目のスケジュールを図Ⅱ(3.6)-2に示す。

開発項目		H27	H28	H29
シリカ回収事業の事業性FS		FS検討	FS継続検討	FS詳細検討・結論BPと事業性目標設定
還元熱水スケール誘引物質の高機能材料 シリカ回収技術の開発	基本設計	基本設計	基本設計・技術調査	基本設計・技術調査
	パイロットプラントの設計・製作・実証	設計	還元熱水シリカ濃度: 500ppm 製作 実証試験 データ分析	還元熱水シリカ濃度: 1000ppm 移設 実証試験 データ分析
	シリカ回収プロセスとリチウム回収プロセスの共有化の検討	机上検討	机上検討	準備 実証試験 データ分析
	実規模概念設計検討	事前調整	基礎情報収集・技術項目抽出	設備の概念設計
	リチウム回収技術の開発	手法の設計	工場試験・データ分析	準備 実証試験 データ分析
	還元井延命化効果の推定	文献調査	モデル化・実験装置製作	準備 実証試験 データ分析
バイナリー発電導入時の事業費低減の検討		基本設計	事業モデルによる検討	事業モデルによる評価
シリカ回収の事業化に向けた調査・検討		市場調査	ユーザーの要求品質調・市場査	ユーザーの要求品質・市場調査

図Ⅱ(3.6)-2 研究開発のスケジュール

(3.6.4) 研究開発の実施体制

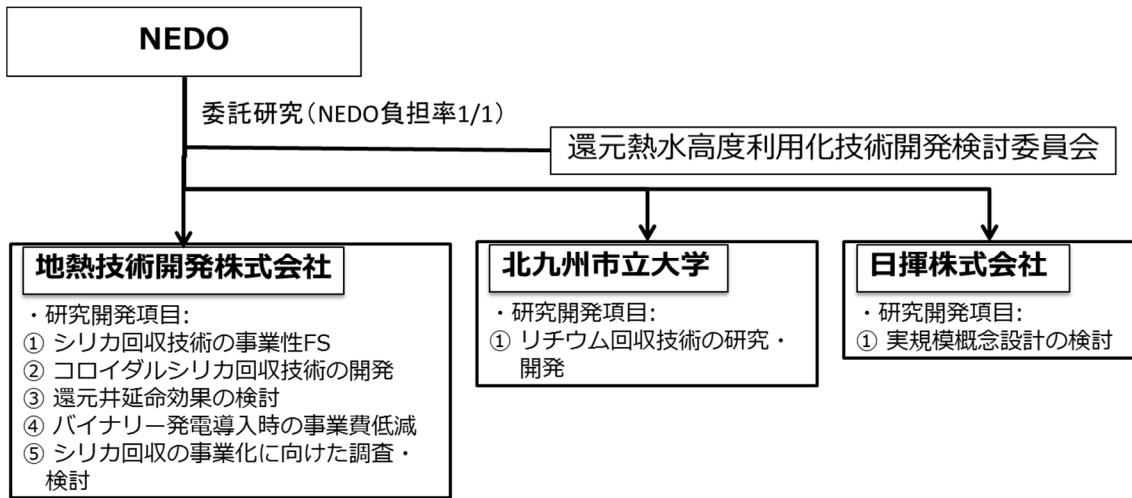


図 II (3.6)-3 実施体制図

(3.6.5) 事業の管理運営

表 II (3.6)-2 還元熱水高度利用化技術開発検討委員会

担当	氏名 (敬称略)	所属
委員長	糸井 龍一	元工業技術院 東北工業技術研究所 金属素材部長
委員	横山 拓史	九州大学大学院理学研究院 化学部門 教授
委員	加藤 修	東北自然エネルギー株式会社 雫石事業所 副所長

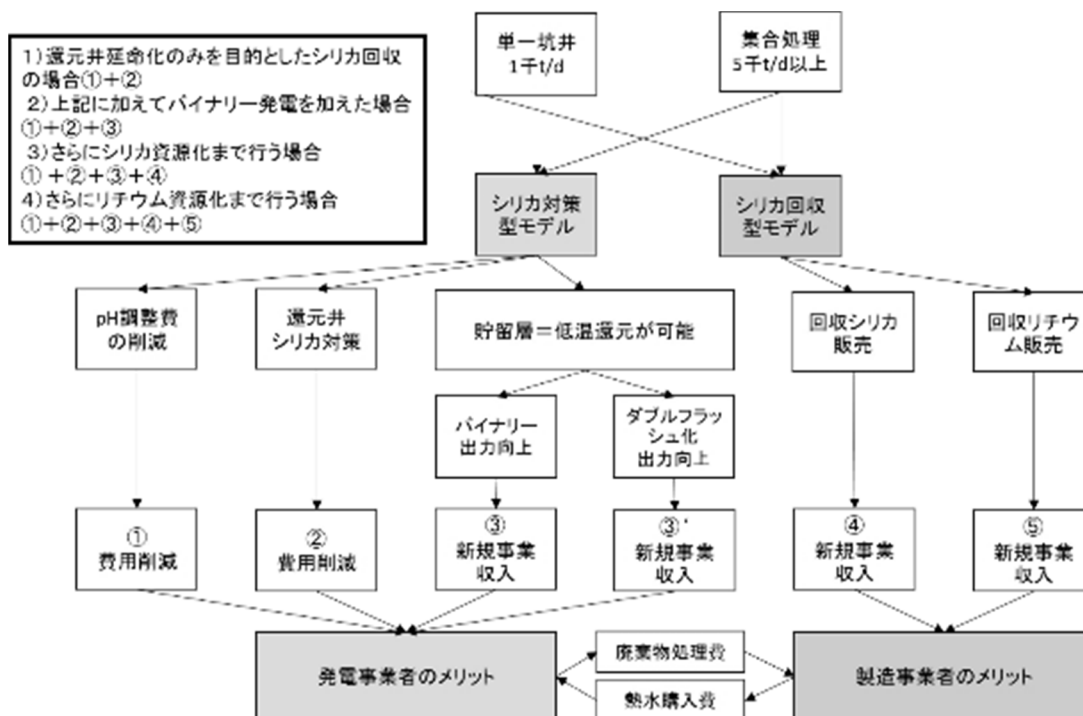
III. 研究開発成果について

① シリカ回収事業の事業性 FS

事業モデルについては、還元井ごとにシリカ回収を行う場合（還元熱水処理量 1,000t/日）と集合方式で還元井基地ごとにシリカ回収を行う場合（還元熱水処理量 5,000t/日）の2つに分けて整理する。また、事業に当たっては、発電事業者によるシリカ対策を中心とした事業モデル（シリカ対策型モデル）とシリカ製造事業者によるシリカ回収を中心とした事業モデル（シリカ回収型モデル）に二別される。シリカ対策型モデルでは、①現在一般的に地熱発電所でのシリカ付着抑制対策に用いている酸添加によって pH5~5.5 程度に pH を制御することによってシリカ付着抑制を行う pH 制御法

の費用削減効果, ②還元井ならびに周辺の地層にシリカが沈着することによる還元井の透水性低下を原因とする還元井の還元能力低下が及ぼす還元井の寿命低下と補充還元井の掘削による事業費(ランニングコスト)抑制効果, ③還元井のシリカ付着が抑制されることによる還元熱水温度を低くすることが可能にするバイナリー発電やダブルフラッシュ発電による発電量の増加効果がある。シリカ回収型モデルでは, ①回収したシリカを販売する効果, ②シリカ回収後の還元熱水から二次回収したリチウムを販売する効果の2点が挙げられる。

シリカ回収事業の事業性FSに関して、シリカ回収事業の4つのビジネスモデルとして、i)シリカ回収事業単体 ii)シリカ回収プロセス+リチウム回収プロセス、iii)シリカ回収事業+還元井延命効果、iv)シリカ回収事業+還元井延命効果+バイナリー発電事業を想定して、シリカ濃度1,000ppmの還元熱水で、単一坑井(熱水量1,000t/d)の場合と集合方式(熱水量5,000t/d)について検討した。その結果、目標のIRR10%(7年)については、商業ベースのプラント建設コストの目標値を海外事例の1.5倍程度とした場合、単一坑井でiv)の場合、集合方式でiii), iv)の場合に目標を超えた。また、今後、製品品質を向上することで、単一坑井・集合方式ともiii), iv)で目標を超えた。i)については黒字となるが目標以下となった。ii)については主にポンプの買電の割合が大きく、電力消費の抑制が課題となった。



図III (3.6)-1 シリカ回収の事業モデルの考え方

表 III (3.6)-1

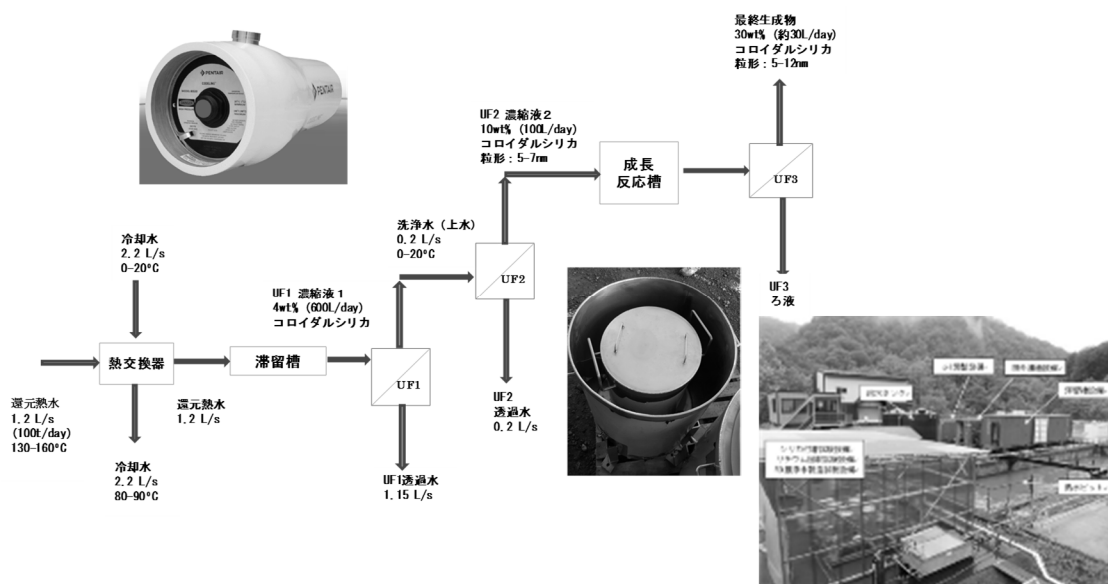
事業性試算結果 (IRR10%(7年)の場合の30%コロイダルシリカ販売目標価格)

熱水量	単一坑井(1,000t/d)		集合処理(5,000t/d)		集合処理(10,000t/d)	
	含ず	含む	含ず	含む	含ず	含む
還元井延命効果(15年間)(円)	0億	2.6億	0億	12.8億	0億	25.7億
販売価格(円/kg)	201.9	190.0	148.5	139.8	127.0	118.5
IRR(7年)	10.0%	10.0%	10.0%	10.0%	10.0%	10.0%
IRR(15年)	21.4%	22.9%	23.6%	24.7%	23.8%	25.0%
初期投資(円)	5.50億円	5.50億円	23.4億円	23.4億円	38.5億円	38.5億円
年間収入(シリカ)(円)	1.71億円	1.62億円	7.98億円	7.51億円	14.0億円	13.1億円
操業費(円)	1.32億円	1.32億円	5.63億円	5.63億円	10.3億円	10.3億円
うち消費電力(円) @16円/kWh	0.31億円	0.31億円	1.53億円	1.53億円	3.07億円	3.07億円

② 還元熱水中のスケール誘引物質の高機能材料化技術開発

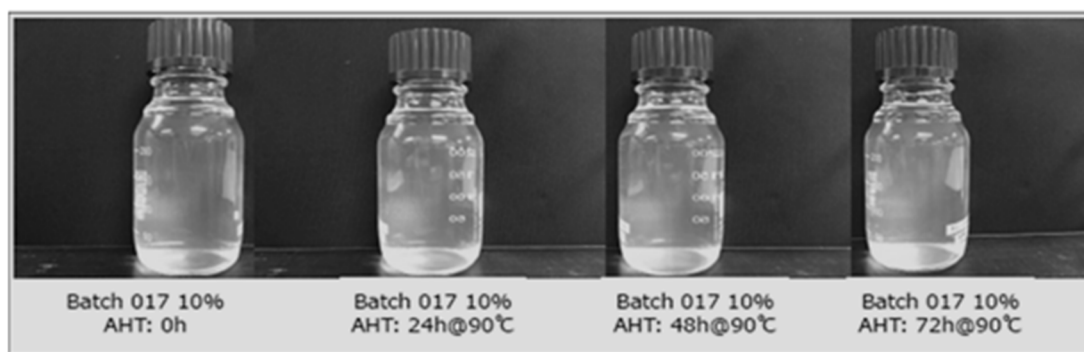
②-1 コロイダルシリカ回収技術の開発 (基本設計, シリカ回収プロセスのパイロットプラント設計・製作, シリカ回収プロセスとリチウム回収プロセスの共有化の検討)

還元熱水からのシリカ回収技術として、溶存しているモノマーシリカをコロイダルシリカとして回収する技術について、ニュージーランドにて実証試験が進められている試験プラントをベースにして、我が国の地熱発電所の実情に合致する試験プラント(日生産量 100ton 規模)の基本設計を検討した。コロイダルシリカ回収プロセスの概要と建設したパイロットプラントを示す。



図III (3.6)-2 コロイダルシリカ回収設備のプロセス概要と葛根田生産基地に設置したパイロットプラント

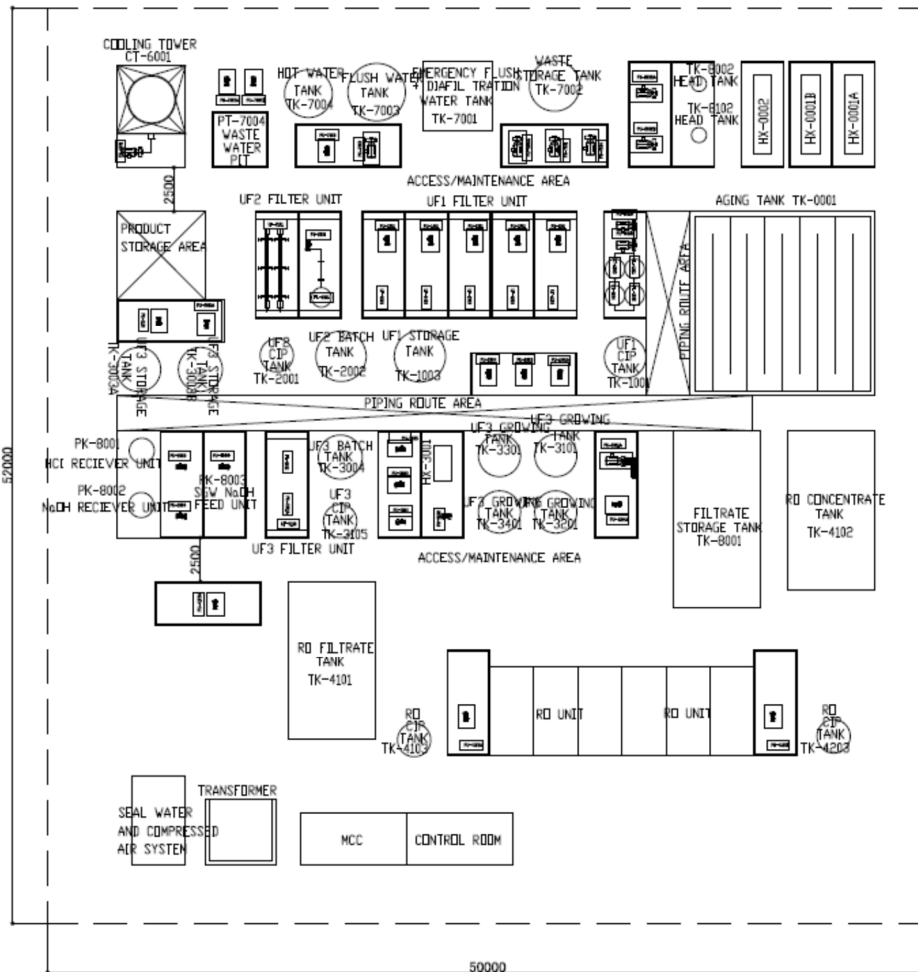
コロイダルシリカ回収技術については、基本設計、パイロットプラント(熱水処理量 100t/d)の設計・製作を行い、これを用いて、平成 28 年度にシリカ濃度 500ppm 程度の還元基地の熱水、平成 29 年度にシリカ濃度 1,000ppm 程度の生産基地の汽水分離後の熱水を用いて、コロイダルシリカ (30%SiO₂, 12nm) の精製に成功し、ヒ素などの有害物質を取り除いた上で、精密鑄鋼バインダーレベルの中級品質を達成した。精製したコロイダルシリカの特徴として、本回収・精製技術は、不純物を選択的に除去するプロセスがないため、K、Ca 等の一部の金属元素で還元基地熱水、および生産基地分離熱水の熱水成分差が表れる結果となったが、ヒ素等の有害物質が検出限界値以下まで除去されていることを確認できた。Fe については、生産基地分離熱水からの回収コロイダルシリカでは、目標値を大きく下回ることが出来たが、還元基地熱水からの回収コロイダルシリカ中には多く含有される結果となった。これは熱水由来ではなく、還元基地特有の配管構造が一因していると考えられ、長い配管を用いるプロセスの中で、配管中の Fe 成分が溶解したものと考えられる。また、市場流通標準品との比較で Na 含有量が少ないことが確認できた。これは製法の違いにより生じる特徴の一つであると言える。一般的なコロイダルシリカはケイ酸ソーダ (Na₂SiO₃) を原料として製造されるため 3,000-5,000ppm 程度の Na が含有されている。平成 29 年度には、シリカ回収プロセスとリチウム回収プロセスを共有化し、パイロットプラントで試験を行い、シリカ回収とリチウム回収の共有化によってシリカ回収後の還元熱水を用いることで、リチウム回収における吸着性能の大幅向上を確認できた。



図Ⅲ (3.6)-3 精製したコロイダルシリカの例

②-2 コロイダルシリカ回収技術の開発 (実規模概念設計)

地熱コロイダルシリカ回収設備の 1,000 トン/日と 5,000 トン/日の還元熱水処理量を持つ設備の概念設計を実施して、実規模概念設計を実施し、実用化に必要な技術課題を抽出した。



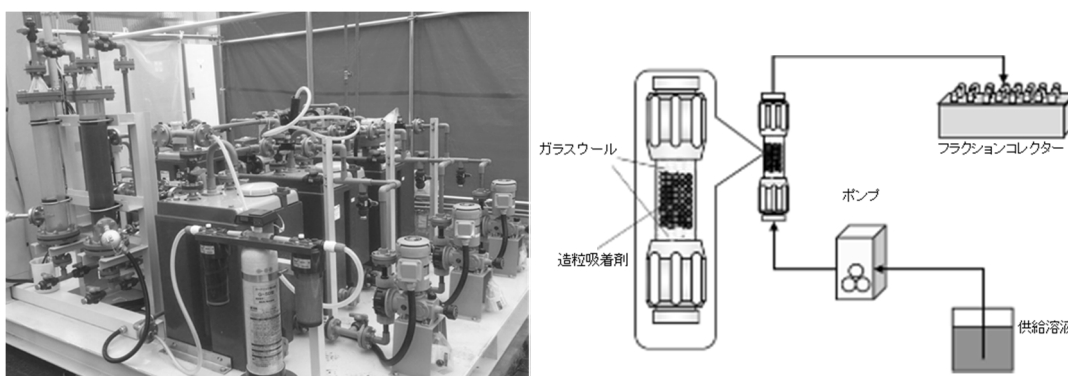
図Ⅲ (3.6)-4 処理能力 5000t/日の機器配置図

コロイダルシリカ回収設備を運転するためには、プラント用水を必要とする。河川水等により確保できれば問題ないが、確保が困難な地熱発電所もあるため、本技術を実用化・普及するためには、プラント用水の確保が重要な課題の一つである。本研究では、そのため、コロイダルシリカ回収設備で発生するUF膜透過水から、逆浸透膜を利用して清水を製造するシステムの導入を検討した。今後は長期間運転による適用妥当性を確認する必要があると考えられる。また、コロイダルシリカ回収プロセスでは、還元熱水のpH値を適切に管理する必要がある。そのため、還元熱水中のシリカスケール等の不純物に対して、pH測定の安定性の確認が必要であり、今後は長期間運転による適用妥当性を確認する必要がある。また、運転員の負荷軽減のため、還元熱水のpH値を自動管理する技術が必要であると考えられる。運転コスト低減の観点から、駆動機器の電力使用量を節減する技術を導入することが望ましいと考えられる。今後は、後述の技術課題の解決、および経済性の観点から、運転コスト低減を図る必要があり、技術的現実性と経済性を達成することにより、実用化は可能であると考えられる。

②-3 リチウム回収技術の開発

地熱水からリチウムを分離するために必要な吸着分離剤、及びリチウム回収システムを開発することを目的として、新規のリチウム吸着剤の開発およびリチウムの選択的分離濃縮に必要な吸着分離回収プロセスの開発を行った。本研究開発により、以下のような成果が得られた。

- pH9 の水溶液からのリチウムの飽和吸着量 4.3 mmol/g ($= 30 \text{ mg/g}$) を有するリチウム吸着剤の開発を行った。
- オリジナルの全自動運転を可能とするリチウム回収プラントを設計・製作を行った。
- リチウム回収は、葛根田地熱発電所生産基地の分離熱水を脱シリカした UF 膜透過水から吸着剤を充填したカラムを用いてリチウムを吸着分離することで、達成できることを明らかにした。
- 実証試験のデータに基づいて、リチウム回収に掛かるコスト試算を行い、リチウム回収設備を運転するためには、供給する UF 膜透過水に含有するリチウム濃度が大きな影響を及ぼすことを明らかにした。
- 葛根田地熱発電所生産基地での実証試験の結果により、炭酸リチウム 1 kg を回収するために必要なエネルギー量（電気量）は、 385 kWh 、洗浄用水必要量は、 3.7 m^3 と推算された。
- シリカ回収プロセスによりリチウム吸着材に対するシリカの共着を抑制して、原熱水では 5 割程度であった吸着の効率を 9 割程度まで向上させた。

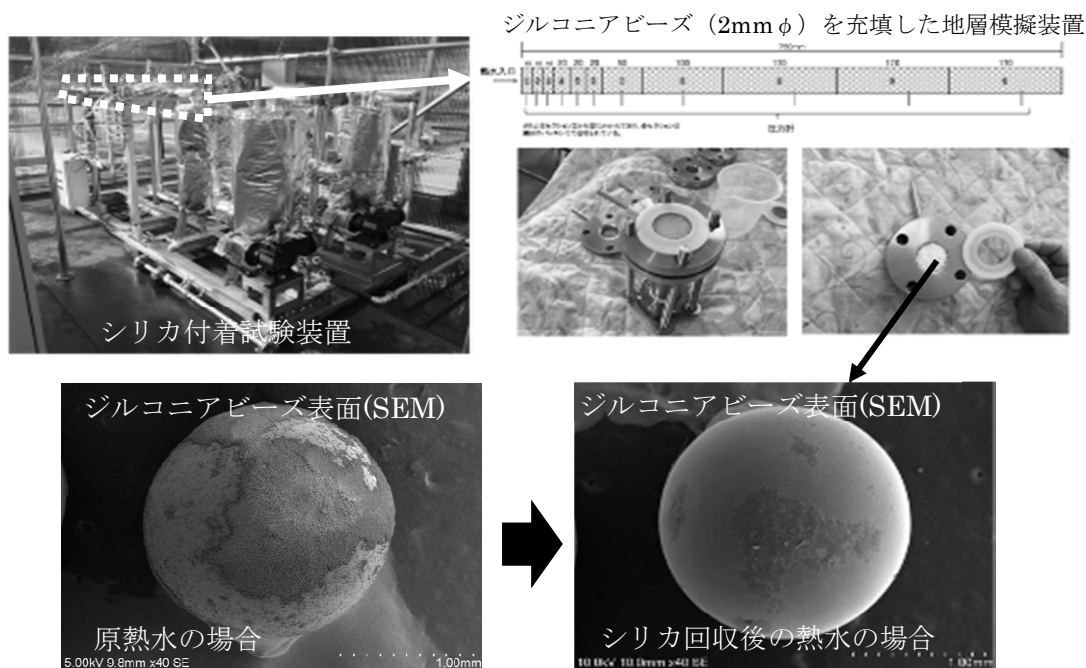


図Ⅲ (3.6)-5 リチウム回収プラント（カラム吸着実験装置）

③ 地熱井延命効果の検討

還元井延命化効果の推定に関して、ジルコニアビーズを充填したカラムを用いた地層を模擬する実験装置を製作して、平成 29 年度のパイロットプラントで原熱水とシリカ回収後熱水のシリカ析出の比較を行った結果、原熱水ではシリカの析出が確認されたが、シリカ回収後熱水では析出はわずかしき確認されず、還元井のシリカ析出による

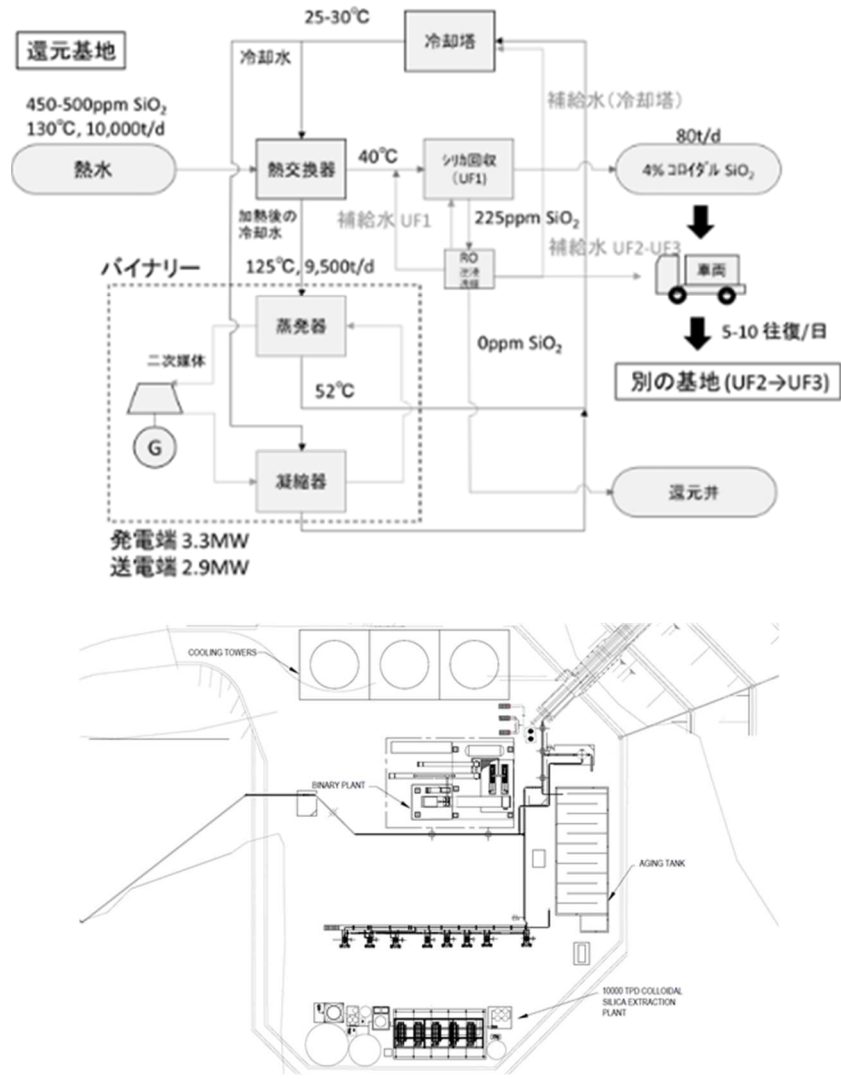
寿命劣化はほとんどないという結論を得た。



図III (3.6)-6 シリカ付着試験装置による原熱水とシリカ回収後熱水のシリカ付着結果 (SEM 画像)

④ バイナリー発電導入時の事業費低減

バイナリー発電を行った場合の事業費低減効果について、検討を行った。仮定として、160℃→40℃まで温度回収する場合を想定した。また、シリカ回収設備のポンプ動力はこの電源で賄い、残り電力(送電端電力)を再生可能エネルギー固定価格買取制度で40円/kWhで売電する場合を想定した。このケースで事業評価を行った結果を表6.2-1に示した。単一坑井でIRR(7年)10%を達成する条件では、還元井延命効果を考慮しない場合でもコロイダルシリカ販売価格112.4円/kgで、単一坑井で還元井延命効果を考慮した場合で101.4円/kgで現状の精製品(精密鋳鋼用バインダや土壌改良剤)の販売価格(100円/kg)に近い数字となった。また、集合処理の場合、105.4～83.0円/kgとほぼ目標(IRR(7年)で10%を超えること)を達成できた。



図Ⅲ (3.6)-7 敷地の狭い基地内を想定して、シリカ回収設備にバイナリー発電を加えたモデルケースの例

表Ⅲ (3.6)-2 事業性試算結果(*冷却塔・熱交換器・操業員などシリカ製造と発電で共有化する)
(バイナリー発電を含めた IRR10%(7年)の場合の 30%コロイダルシリカ販売目標価格)

熱水量	単一坑井(1,000t/d)		集合処理(5,000t/d)		集合処理(10,000t/d)	
	含まず	含む	含まず	含む	含まず	含む
還元井延命効果 (15年間)(円)	0億	2.6億	0億	12.8億	0億	25.7億
販売価格(円/kg)	112.4	101.4	105.4	96.8	91.5	83.0
売電価格(円/kWh)	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0	40.0
送電端出力(kW)	220	220	1,100	1,100	2,200	2,200
IRR(7年)	10.0%	10.0%	10.0%	10.0%	10.0%	10.0%
IRR(15年)	22.0%	21.3%	24.1%	25.1%	24.4%	25.3%
初期投資(円)**	6.60億	6.60億	34.4億	34.4億	63.3億	63.3億
年間収入:シリカ(円)	0.95億	0.86億	5.66億	5.2億	10.1億	9.16億
年間収入:発電(円)	0.72億	0.72億	3.58億	3.58億	7.17億	7.17億
操業費:全体(円)**	1.13億	1.13億	5.19億	5.19億	9.70億	9.70億

⑤ シリカ回収事業に向けた調査・検討

シリカ回収の事業化に向けた調査・検討に関して、国内地熱発電所の還元熱水の実態調査を行い、シリカ回収事業の有望地点の調査を行った。また、市場調査によって、潜在ユーザーの品質要求に耐えうること、販売可能価格、ならびに市場規模を把握した。

表Ⅲ(3.6)-3 特許、論文、外部発表等

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表		
	国内	外国	PCT※ 出願	査読 付き	その 他	学会発 表・講演	新聞・雑誌 等への掲載	その他
H27FY	0件	0件	0件	0件	0件	0件	0件	1件
H28FY	0件	0件	0件	0件	0件	1件	0件	0件
H29FY	0件	0件	0件	0件	0件	3件	0件	0件

(※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約)

[最終目標に対する成果と達成度]

表Ⅲ(3.6)-4 最終目標に対する成果と達成度

開発項目		開発目標	成果	達成度
シリカ回収事業の事業性 FS		IRR10%(7年)程度を見通せること	還元井延命効果ないしハイナリーとの併設でIRR10%(7年)以上を達成	○ (達成)
還元熱水のスケール誘引物質の高機能材料化技術	基本設計	平地不足・冷却水調達困難・買電単価が高い・還元井分散などの立地条件への対応	立体配置・RO膜濾液処理・ハイナリーの所内動力への活用・1000 t/d 級プラントの設計	○ (達成)
	パイロットプラントの設計・製作・実証	パイロットプラント(熱水 100t/d)を製作してシリカ濃度 500ppm,1000ppm 程度の熱水で実証を行い、コロイダルシリカ(濃度 20-40%wt, 粒径 10-20nm)を実サイトで製造	葛根田の熱水(シリカ濃度 460ppm, 1,100 ppm)から 30%wt,12nm のコロイダルシリカを生成、利用ユーザー(中級品:精密鑄鋼用・土壤硬化材)の要求レベル品質を達成	○ (達成)
	シリカ回収プロセスとリチウム回収プロセスの共有化の検討	シリカ回収プロセスの濾液をリチウム回収プロセスで用いることで共有化によるコスト低減の可能性を示す。	リチウム回収の効率が 5 割から 9 割に向上	○ (達成)
	実規模概念設計検討	地熱コロイダルシリカ回収設備の 1,000 トン/日と 5,000 トン/日の還元熱水処理量を持つ設備の概念設計の実施	実規模概念設計を実施し、実用化に必要な技術課題を抽出した。	○ (達成)
	リチウム回収技術の開発	地熱水から飽和吸着時点で吸着材容量 1ℓあたり 20g 吸着可能なリチウム吸着材の開発 地熱水からのリチウムの選択的分離濃縮に必要な吸着分離材・分離回収プロセスの開発と将来の経済的回収への道筋提示	pH8.5 の水溶液からのリチウムの飽和吸着量 3.67 mmol/g (= 25 g/L) を達成 リチウム回収装置を製作し、地熱水からのリチウム回収の実証試験を行い、リチウム回収のコスト試算を実施	○ (達成)
還元井延命化効果の推定	還元井寿命を 2 倍以上に延命化可能であること、地熱発電所全体の事業性向上が可能であることを示す。	シリカ回収技術を適用した模擬地層装置による実験で還元井地層へのシリカ付着量が 1/5 程度に低減したことで還元井は約 5 倍の延命ができる可能性が示唆された。 ・延命効果によって、30MW 級地熱発電所において 15 年間で 25.7 億円の経費削減が可能であることを示した。	○ (達成)	
ハイナリー発電導入時の事業費低減の検討	実サイトでのハイナリー発電導入想定時にシリカ回収との	ハイナリー動力を発電所ないしシリカ回収プラントの動力利用の	○ (達成)	

	組み合わせによる事業費低減を示す。	場合に最大の事業費低減効果確認	
シリカ回収の事業化に向けた調査・検討	国内地熱発電所の状況調査、コロイダルシリカの市場性調査	有望な国内地熱発電所の抽出、コロイダルシリカユーザーによる評価・販売コスト・市場規模を把握した。	○ (達成)

IV. 事業化へ向けての見通しと取組みについて

(見通しについて)

- ① 地熱還元熱水から、コロイダルシリカを回収して、市販のコロイダルシリカ製品と同等レベルの品質を有するコロイダルシリカの基本的な製造技術を開発、実証し、さらに、実規模で製造する設備の概念設計を行った。
- ② 地熱還元熱水からリチウムを回収して、市販のリチウムイオン電池用の高純度炭酸リチウム製品と同等レベルの品質を有する炭酸リチウムの製造技術を実証し、回収に掛かるコスト試算を行った。
- ③ シリカ回収事業のFSにおいて、還元井延命化効果、バイナリー導入効果、市場調査結果に基づきシリカ回収事業の4つのビジネスモデル、i)シリカ回収事業単体、ii)シリカ回収プロセス+リチウム回収プロセス、iii)シリカ回収事業+還元井延命効果、iv)シリカ回収事業+還元井延命効果+バイナリー発電事業において、シリカ濃度 1,000ppm の還元熱水で、単一坑井(熱水量 1,000t/d)の場合と集合方式(熱水量 5,000t/d)について検討した結果、目標のIRR10%(7年)については、商業ベースのプラント建設コストの目標値を海外事例の1.5倍程度とした場合、単一坑井でiv)の場合、集合方式でiii), iv)の場合に目標を超えた。また、今後、製品品質を更に向上できた場合、単一坑井・集合方式ともiii), iv)で目標を超えた。i)については黒字となるが目標以下となった。ii)については主にポンプ電力の買電の割合が大きく、電力消費の抑制が課題となった。
- ④ 今後は、後述の技術課題の解決、および経済性の観点から、製品の更なる品質向上、プラント建設費の更なる低減、運転コスト低減を図る必要があり、技術的現実性と経済性を達成することにより、実用化は可能であると考えられる。

(取組み)

- ① 事業性の更なる向上のため、回収コロイダルシリカの品質を更に向上して現状の100円/kg程度(精密鋳鋼・土壌改良剤など)レベルから200円/kg程度(半導体研磨剤)にする、あるいは沈降性シリカ用途(シリカゲル、ホワイトカーボン(タイヤ原料)など)の高付加ナノシリカ製品の精製を目指す。
- ② コロイダルシリカ回収設備運転のためのプラント用水確保のためにコロイダルシリカ回収設備で発生するUF膜透過水から、逆浸透膜を利用して清水を製造するシステ

ム導入を検討した結果、今後は長期間運転による適用妥当性を確認する必要があると考えられる。

- ③ コロイダルシリカ回収プロセスで、還元熱水の pH 値を適切に管理するために還元熱水中のシリカスケール等の不純物に対して、pH 測定の安定性の確認が必要であり、今後は長期間運転による適用妥当性を確認する必要がある。また、運転員の負荷軽減のため、還元熱水の pH 値を自動管理する技術が必要であると考えられる。
- ④ リチウム回収は、還元熱水を脱シリカした UF 膜透過水から吸着剤を充填したカラムを用いてリチウムを吸着分離することで、達成できることを明らかにした。
- ⑤ 実証試験のデータに基づいて、リチウム回収に掛かるコスト試算を行い、リチウム回収設備を運転するためには、供給する UF 膜透過水に含有するリチウム濃度が大きな影響を及ぼすことを明らかにした。
- ⑥ 買電コストが操業費の大きな部分を占めるため、運転コスト低減の観点から、駆動機器の電力使用量を節減する技術を導入することが望ましいと考えられる。

個別テーマ(3.7)

(3) 発電所の環境保全対策技術開発

※「(4)地熱発電の導入拡大に資する革新的技術開発」テーマ

(3.7)地熱発電プラントのリスク評価・対策手法の研究開発(スケール/腐食等予測・対策管理)

委託先 地熱技術開発株式会社、国立研究開発法人産業技術総合研究所、
エヌケーケーシームレス鋼管株式会社

II. 研究開発マネジメントについて(事業の計画内容)

(3.7.1)背景と目的

地熱資源は、地下に賦存する熱水・水蒸気(地熱流体)をリソースとすることから、その地熱流体に含まれる様々な化学物質の性状が、地熱発電所の操業に大きな影響を及ぼす。地熱流体の性状は多様であり、単一の対策で全ての地熱発電所の問題を解決することはできないため、適正な手法を選択するための評価が必要となる。一方、対策によって加えた薬液や材料により二次的な問題(例えば、二次生成物による新たなスケールの発生や適した化学物質による新たな腐食の発生等)が生じることもあり、対策技術の効果予測も含めたリスク評価が不可欠である。過去に行われた国内の地熱事業者へのアンケート調査によると、各設備の損傷事故のうち、地熱井・流送配管・発電設備の損傷事故が48.1%とほぼ半分を占める。また、損傷への対応は、交換が41.2%、材料の高級化が15.9%、補修が7.3%、その他が35.5%となっており、交換や材料の高級化等のコスト負担の過大な対応が必要になるため、このようなトラブルの発生は、地熱発電所の操業費の高騰による事業採算性の悪化につながる。また、損傷形態としては、全面腐食が28.0%、エロージョンが25.4%、スケール付着が23.7%と各々全体の1/4を占めている。

そこで本事業では、発電所の設計段階でこれらのリスクを予測して、適切な対応を行うことができ、操業時のリスクを低減することが可能となるリスク評価システムを開発することを目的とする。

(3.7.2)研究開発の概要

本事業では、地熱発電プラント(温泉発電を含む)の操業において、地熱流体に含まれる化学物質に起因する腐食・スケール付着による損傷事故のリスクを低減するための予測計算技術とデータベースによる事例検索に基づき、損傷事故の予測を行い、適正な対策手法を提示するリスク評価システム技術を確立することで、地熱発電の操業リスクを低減するための技術を確立する。本技術開発の第1フェーズ(平成26年度～平成27年度)では、地熱発電所におけるリスク予測技術の要素開発を行い、リスク評価シス

テムの全体システムを設計する。その後、平成 27 年度末の中間評価を経て、第 2 フェーズ(平成 28 年度～平成 29 年度)では、平成 27 年度までの成果に基づき、全体システムの統合、システムの改良、フィールドにおける実証試験を行い、技術の実用化を図る。

①リスク評価システム開発(全体システム開発)(担当：地熱技術開発株式会社)

地熱発電プラントのリスク評価システムとして、予測技術・データベース・リスク評価システム・モニタリングシステムの各基本モジュールを統合して、地熱発電プラントの形状・地熱流体の性状等を入力することで、その地熱発電プラントの個々の箇所で予測される障害、障害の克服に必要な材料や対策技術選定、発電所操業時に必要となるモニタリング技術を提示し、それに掛かる費用概算が可能なリスク評価システムの全体設計を行う。

②腐食・侵食・スケール付着予測技術(担当：地熱技術開発株式会社)

本項目では、地熱流体の性状によって、地熱発電プラントの坑井設備・地上設備で発生する腐食・侵食・スケール付着を予測するための二相流動・地化学モデル連成シミュレーションを用いた腐食やスケール付着の予測計算技術の開発を行う。並列計算による OpenFOAM®をベースとして、化学平衡反応シミュレータを組み込み、連成で解くことで、地熱流体の性状によって、地熱発電プラントの坑井設備・地上設備で発生する腐食・侵食・スケール付着を予測するための二相流動・地化学モデル連成シミュレーションを用いた腐食やスケール付着の予測計算技術の基本モジュールの開発を行う。

③材料腐食およびスケールデータベースの整備(担当：国立研究開発法人産業技術総合研究所)

地熱材料腐食に関しては、産総研東北センター(旧東北工業技術研究所)で 2002 年までにまとめられたデータベースに新規データを加えた再整備を行う。また、文献調査や企業への聞き取り調査などにより、材料腐食データベースの構築を行う。スケールデータベースのデータ収集を進める。

④地熱材料選定の研究(担当：エヌケーケーシームレス鋼管株式会社)

サンシャイン計画の実績整理、対象を広げたアンケート調査と選択したフィールドとの問題点整理、選択したフィールドにおける短期モニター調査、必要に応じた腐食試験、得られた成果にもとづいた材料選択のための腐食データベース構築を行う。

⑤プラントリスク評価システムのためのモニタリング(担当：地熱技術開発株式会社、国立研究開発法人産業技術総合研究所)

地熱発電所の流体性状は、操業後に変化していくため、その情報をフィードバックし

て、リスク評価システムで再評価して、変化に合わせて対応していくことが発電所の維持において重要である。従って、適正なモニタリングは重要であることから、発電所操業中の維持・管理に必要なコンパクトで低コストのモニタリングシステムの設計・開発を行う。

受託者(地熱技術開発株式会社)は、配管等にバイパス経路として設置可能な可搬組立式のフィールド試験におけるフロー試験装置を開発する。受託者(産業技術総合研究所)は、整備された材料腐食およびスケールデータベースなどをもとに開発されたプラントリスク評価システムの検証を行うために、実際の地熱発電所あるいは調査地域において実証試験を行い、材料の腐食状況やスケール付着状況についてのモニタリング(材料の観察評価、材料の腐食やスケール付着速度の測定)を行う。

⑥地熱発電プラントリスク評価実証試験(担当：地熱技術開発株式会社)

実際の地熱発電所において、地熱井、坑口装置、流送配管、発電設備を含む地熱プラント全体で発生する腐食・侵食・スケール付着等の問題発生を予測し、データベースによってその対策法を選定して、実証試験が可能な箇所において、対策を施した場合と施さなかった場合での効果を検証する。本研究では、実証試験地点の選定を行うとともに、そこに設置する実証試験装置を製作してその動作確認を行う。既設の地熱発電所の過去のデータに基づき、基本モジュール群を用いた一連のプロセスを実行する地熱発電プラントリスク評価システムプロトタイプでの机上評価を行う。

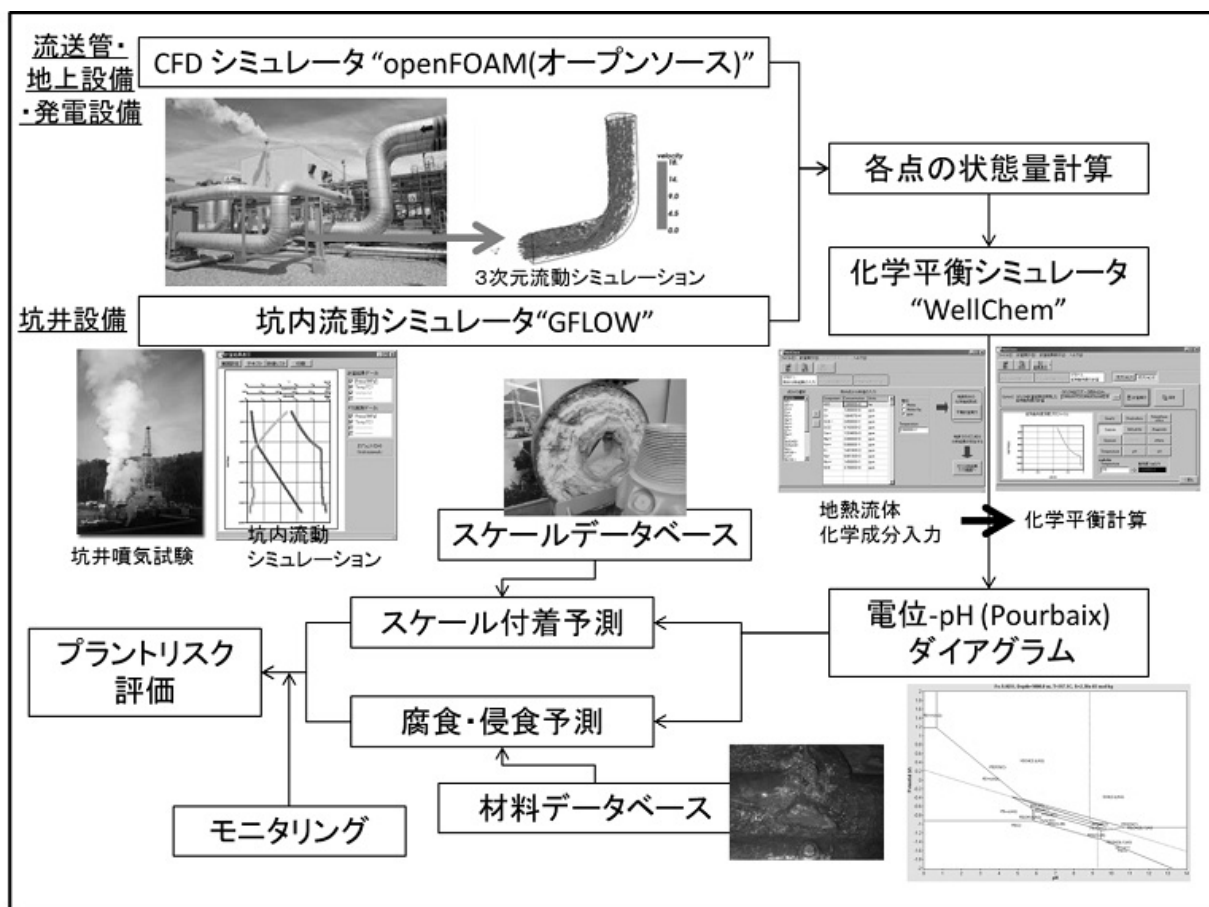


図 V (3.7)-1 地熱発電プラントリスク評価システムの全体構成

表 V (3.7)-1 研究開発目標と根拠

事業項目	開発目標	目標レベル設定の根拠
①リスク評価システム (WEBベースの腐食・スケール予測計算システムと材料選定フローの整備)	地熱開発の現場において遭遇する様々のリスクケースを整理した上で、各ケースでどのようなインプットが行われ、それに対してどのようなアウトプット（回答）が得られるかを示し、将来的にアウトプットがどのような場面で有効活用されるかを具体的にとりまとめる。	過去にまとめられた地熱流体による腐食・スケール制御の体系及び材料選定フローチャートに基づき、見直しと新たな手法の追加によって体系とフローチャートを見直してとりまとめる。
②腐食・浸食・スケール付着予測技術の開発	予測技術モジュールを用いて、過去の地熱発電所での事例	3次元CFD・地化学モデルによる地熱の二相流動

<p>(3次元CFDと化学平衡反応計算シミュレータの連成・スケール成長シミュレータ)</p>	<p>をトレースして、リスク評価として適切な回答が得られることを示す。</p>	<p>計算の事例は無かったが委託先が元々有する1次元CFDと地化学モデルをベースとすることで実現可能。</p>
<p>③地熱腐食データベース・地熱スケールデータベースの構築 (Cr当量による材料別腐食速度計算データベース・文献データベースの整備)</p>	<p>2002年以前のサンシャイン計画材料データベースの再構築と2002年以降の論文・報告書の調査ならびに新たな材料試験を行い、2002年以前のデータベースに追加して、データベースの更新を行う。</p>	<p>サンシャイン計画材料データベースの蓄積を基に、その後の超臨界条件での材料研究の成果を反映できる。</p>
<p>④材料選定の研究開発 (サンシャイン計画材料データベースに基づく腐食速度回帰式の整備)</p>	<p>既存情報(サンシャイン計画材料データベース、文献、既存発電所など)を整理し、補完的な腐食試験を実施して、材料選定手法(材料選定フローチャート)をとりまとめる</p>	<p>サンシャイン計画材料データベースの蓄積を基に、補完的な腐食試験とその後の超臨界条件での材料研究の成果を反映できる。</p>
<p>⑤プラントリスク評価システムのためのモニタリング技術の開発 (腐食試験装置の開発及びスケールモニタリング装置の開発)</p>	<p>低コストでの試験が可能な可搬型フロー式腐食試験装置を開発する。 送流中の配管内のスケールを測定可能なγ線透過型管内閉塞率計測装置を開発する。</p>	<p>ニュージーランドでの事例を分析して、新たな装置を設計する。 国内での過去の事例を分析して、新たな装置を設計</p>
<p>⑥地熱発電プラントリスク評価実証試験 (単相流地上配管と二相流地上配管での実証試験)</p>	<p>条件の異なる既設地熱発電所で上記の①～⑤の手法を適用して、その効果を実証する。</p>	<p>単相流条件(葛根田)と二相流条件での実証試験地点を確保。</p>

(3.7.3) 事業スケジュール

本研究は、平成26年度から29年度までの4か年にわたり実施された。各研究開発項目のスケジュールを図V(3.7)-2に示す。

開発項目	26年度				27年度				28年度				29年度			
	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q
①リスク評価システム WEBベースの腐食・スケール予測計算システムと材料選定フローの整備			事例調査 概念設計			追加事例調査 基本設計				追加事例調査 統合システム試作				追加事例調査 統合システム検証		
②腐食・侵食・スケール 付着予測技術の開発 3次元CFDと化学平衡反応計算シミュレータの連成・スケール成長シミュレータ		CFD導入検証 化学反応モジュール 開発			腐食・スケール予測モジュール 製作・過去事例検証				腐食・スケール予測モジュール 改良・過去事例検証				腐食・スケール予測モジュール 完成・実証試験検証			
③材料腐食およびスケール データベースの整備 Cr当量による材料別腐食速度計算データベース・文献データベースの整備		既存情報整理 新規情報追加			新規情報追加 データベースシステム 設計				新規情報追加 データベースシステム 構築				データベースシステム 改良			
④材料選定の研究 サンシャイン計画材料データベースに基づく 腐食速度回帰式の整備		既存情報調査 新規情報追加			現地調査 アンケート調査				腐食試験 材料選定手法の検討				改良・検証			
⑤モニタリング技術の開 発 腐食試験装置の開発・スケールモ ニタリング装置の開発		計装機器設計 課題整理			計測機器製作と作動試験 ・既存データによるモニタリング 技術適用性検討				実証試験・改良 モニタリングサイト と手法の検討				実証試験・検証 経済性評価 システム適合性検証			
⑥地熱発電プラントリス ク評価実証試験 単相流地上配管と二相流地上配管 での実証試験		実証試験装置 設計			実証試験装置製作と 作動試験				実証試験 評価データ取得				実証試験継続 手法全体の検証			

図V(4.1)-2 研究開発のスケジュール

(3.7.4) 研究開発の実施体制

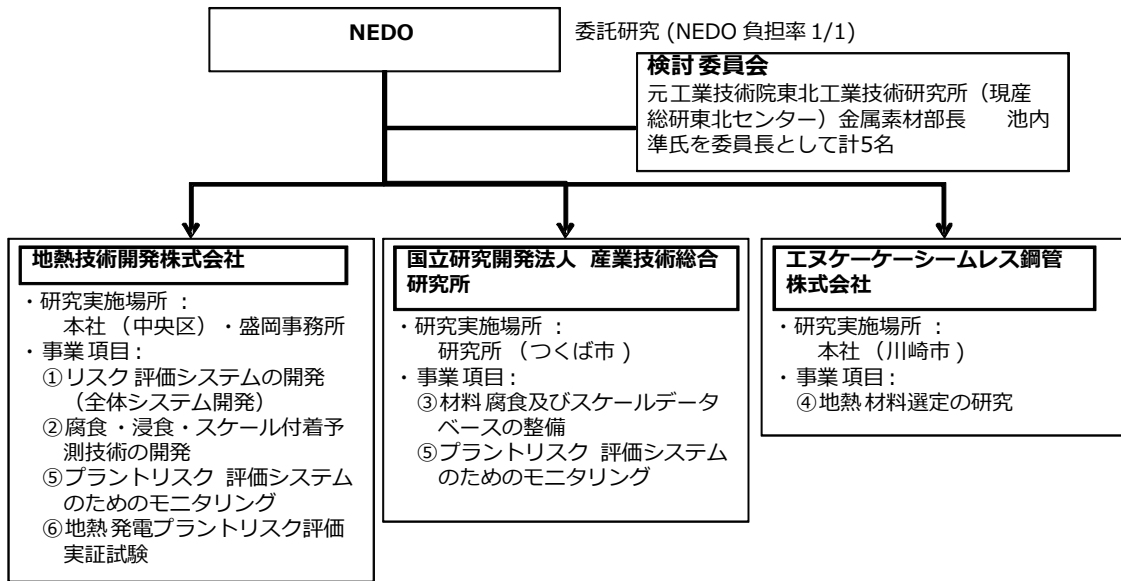


図 V (3.7)-3 実施体制図

(3.7.5) 事業の管理運営

表 V (3.7) -2 地熱発電プラントのリスク評価・対策手法の研究開発(スケール/腐食等予測・対策管理) 技術検討委員会

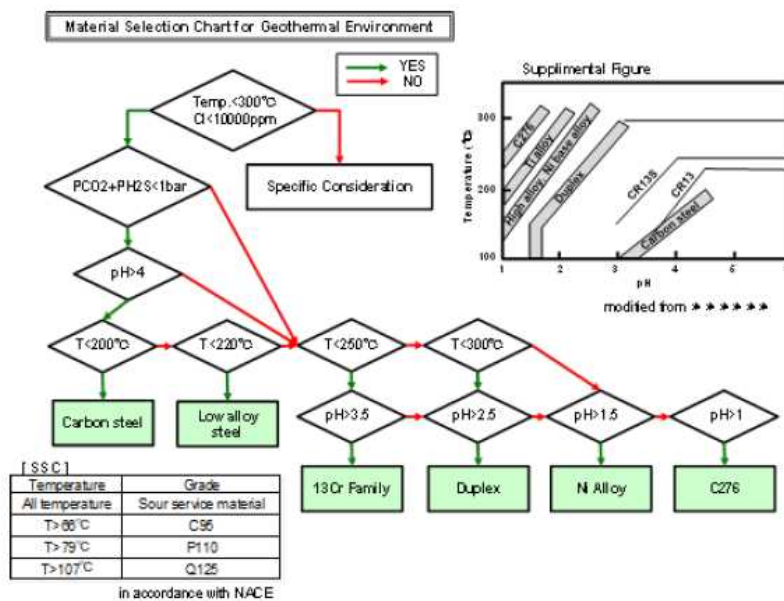
担当	氏名 (敬称略)	所属
委員長	池内 準	元工業技術院 東北工業技術研究所 金属素材部長
委員	真田 徳雄	元産業技術総合研究所 東北センター 基礎素材研究部門 主任研究員
委員	倉田 良明	元産業技術総合研究所 東北センター 超臨界流体研究センター 主任研究員
委員	佐藤 公彦	東北自然エネルギー株式会社 技術本部 地熱事業部 副部長
委員	赤堀 道弘	奥会津地熱株式会社 常務取締役西山事業所長

III. 研究開発成果について

地熱発電プラントの操業において、地熱流体に含まれる化学物質に起因する腐食・スケール付着による損傷事故のリスクを低減するための予測技術とデータベースによる事例検索に基づき、損傷事故の予測を行い、適正な対策方法を提示するリスク評価システム技術を確立することで、地熱発電の操業リスクを低減するための技術を確立することを目的とし、以下の開発成果を得た。

1. リスク評価システム開発

リスク評価システムフローを作成し、地熱発電プラントの腐食・スケールリスクを系統的に整理した。流体性状や地上での腐食・スケール状況をもとに、1) 腐食速度予測計算、2) スケール成長速度予測計算、3) pH-電位線図、4) 文献データベースをWEB上で検索可能なシステムを構築した。本事業で実施した実証試験（地上配管）ならびに強酸性調査井において当該システムを適用して、適切な評価が可能であることを検証した。



図V (3.7)-4 改良版材料選定チャート

2. 腐食・侵食・スケール付着予測技術

坑井内あるいは地上配管内の二相流動現象と腐食および鉱物飽和度について、CFD シミュレータと地化学反応シミュレータによる連成計算を行うシステムを開発した。還元配管中のシリカ粒子について、物理計算に基づくスケール付着シミュレーションを開発し、室内実験ならびに実証試験で得られたスケール成長速度データに対して調和的な結果を得た。

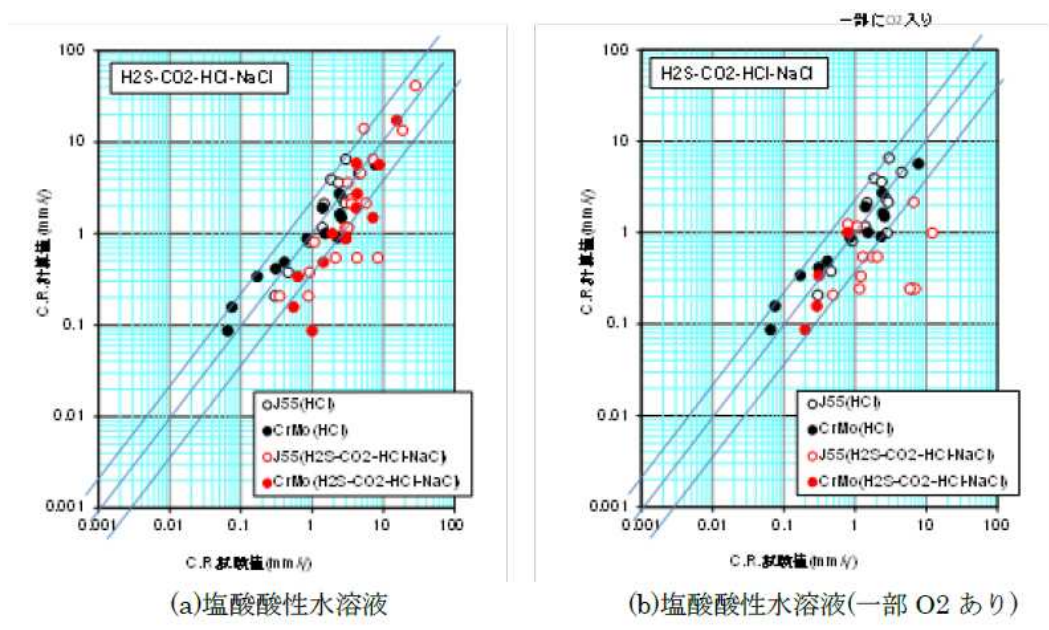


図 V (3.7)-5 炭素鋼と合金鋼における腐食速度の試験結果と計算結果の比較

3. 材料腐食およびスケールデータベースの整理

材料腐食、スケールについて、サンシャイン計画時のデータ再整理、海外動向調査、そして国内での酸性地熱生産井での現地試験および材料腐食予測式との比較検討を行った。材料腐食予測式の適用に当たっては、現地試験や室内実験で、腐食速度が時間に伴い減少傾向にあることから、時間依存性を考慮した上で適用するとともに、二相流の場合は気液の体積比を用いることで予測精度を高めることができる可能性があることが示された。

4. 材料選定の研究

地熱環境下で使用する材料を選定するための最初のステップとして、材料選定フローチャートを改良し提案した。さらに代表的な材料の腐食速度を求めるためにサンシャイン計画時の腐食データをベースに適用範囲に限界はあるものの腐食速度の予測式を作成した。これにより生産井等の長期間の使用に絶えられる材料の選定だけでなく、試掘井等の比較的短期間の使用に限定される材料の選定にも用いることができ、使用条件に応じたコスト的にも適切な材料選定に寄与できるものと考えられる。

5. プラントリスク評価システムのためのモニタリング技術の開発および実証試験

本開発では、現場で簡便に腐食速度の測定を可能にするフロー式ポータブル材料腐食試験設備、スケール付着状況を非接触で測定可能なγ線透過型管内閉塞率測定装置を開発した。

上記により開発された装置を用い、地熱発電所の単相流配管と二相流配管にて実証試験を実施した。試験結果より、材料表面における腐食・スケールのメカニズムについて様々な

現象を確認することができ、腐食試験装置の実用化の目途を立てた。スケール付着については、還元配管および生産井二相配管での2年間の間に沈積したスケール付着状況、ならびにアルカリ中和に伴う不均質なスケール付着に対して測定を行った結果、開放点検時での確認で非常に良い一致を確認でき、技術の実用化の目途を立てた。

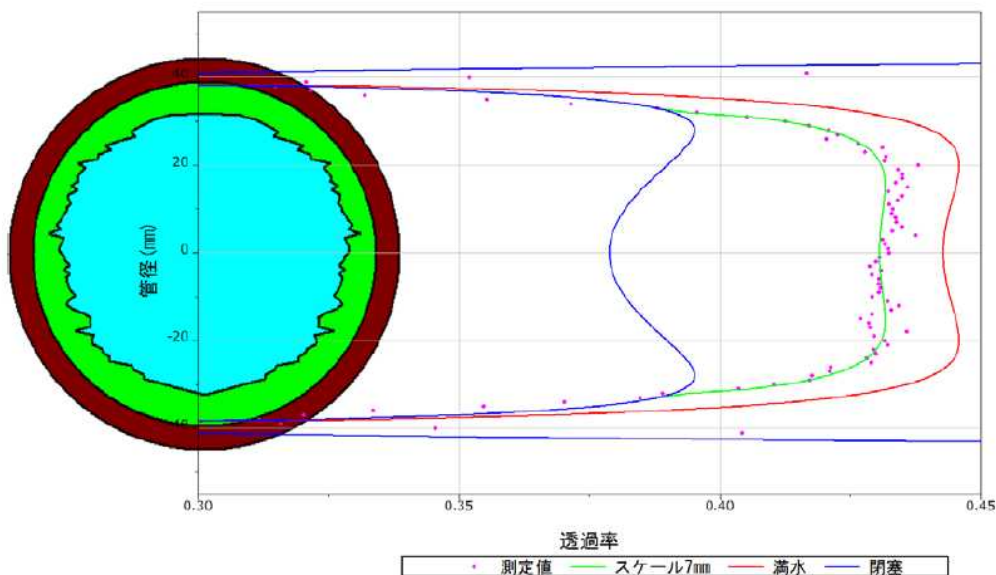


図 V (3.7)-6 スケール閉塞率測定結果図

表 V (3.7)-3 特許、論文、外部発表等

区分 年度	特許出願			論文		その他外部発表		
	国内	外国	PCT※ 出願	査読 付き	その 他	学会発 表・講演	新聞・雑誌 等への掲載	その他
H26FY	0件	0件	0件	0件	0件	1件	0件	0件
H27FY	0件	0件	0件	0件	0件	6件	2件	0件
H28FY	0件	0件	0件	0件	0件	7件	0件	0件
H29FY	0件	0件	0件	0件	0件	4件	0件	0件

(※Patent Cooperation Treaty :特許協力条約)

[最終目標に対する成果と達成度]

表V (3.7)-4 最終目標に対する成果と達成度

開発項目	開発目標	成果	達成度
①リスク評価システム WEBベースの腐食・スケール予測 計算システムと材料選定フローの 整備	地熱開発の現場において遭 遇する様々のリスクケース を整理した上で、各ケース でどのようなインプットが 行われ、それに対してどの ようなアウトプット（回 答）が得られるかを示し、 将来的にアウトプットがど のような場面で有効活用さ れるかを具体的にとりまと める。	EXCELによる材料別 の腐食速度推定式 （Cr 当量式・サシヤイ ン計画データの回帰 式）、スケール成長速度 式、文献検索シス テム、材料選定フローチャ ートを整備した（WEB 化）。	○ （達成）
②腐食・侵食・スケール付 着予測技術の開発 3次元CFDと化学平衡反応 計算シミュレータの連成・スケール成 長シミュレータ	予測技術モジュールを用い て、過去の地熱発電所での 事例をトレースして、リス ク評価として適切な回答が 得られることを示す。	3次元CFDと地化学 平衡反応計算シミュレー タの開発、並びにスケール 成長シミュレータの開発を 実施した。	○ （達成）
③地熱腐食・スケールデー タベースの構築 Cr 当量による材料別腐食 速度計算データベース・文献デー タベースの整備	2002年以前のサシヤイン計画材 料データベースの再構築と2002 年以降の論文・報告書の調 査ならびに新たな材料試験 を行い、2002年以前のデー タベースに追加して更新を行 う。	Cr 当量による材料別 の腐食速度推定式を 導出した。 腐食・スケールに関する 文献データベースを整備 した。	○ （達成）
④材料選定の研究開発 サシヤイン計画材料データ ベースに基づく腐食速度回帰式の整 備	既存情報（サシヤイン計画材料 データベース、文献、既存発電 所など）を整理し、補完的 な腐食試験を実施して、材 料選定手法（材料選定フローチャ ート）をとりまとめる	サシヤイン計画データ ベースの回帰式による材料 別の腐食速度推定式 を導出した。 材料選定フローチャート を更新した。	○ （達成）

<p>⑤プラントリスク評価システムのためのモニタリング技術の開発 腐食試験装置の開発 スケールモニタリング装置の開発</p>	<p>低コストでの試験が可能な可搬型のフローブ腐食試験装置を開発する。 送流中の配管内のスケール分布を外部より測定可能なγ線透過型管内閉塞率計測用装置を開発する。</p>	<p>可搬型のフローブ腐食試験装置で信頼性の高いデータ取得ができた。 閉塞率計測用装置で单相流・二相流配管でのシカスケールの観測ができた。</p>	<p>○ (達成)</p>
<p>⑥地熱発電プラントリスク評価実証試験 单相流地上配管と二相流地上配管での実証試験</p>	<p>条件の異なる既設地熱発電所で上記の①～⑤の手法を適用して、その効果を実証する。</p>	<p>条件の異なる单相流地上配管と二相流地上配管での測定を実施し、二相流、スケール付着の計測への影響を明らかにした。</p>	<p>○ (達成)</p>

IV. 事業化へ向けての見通しと取組みについて

フィリピンで地熱開発・発電所操業(設備容量1,159MW, 2014年12月現在)を行っているEDC(Energy Development Corporation)より、同社の酸性生産井ならびに地上設備における腐食進行の予測ならびに対策としての中和剤の坑井内注入に伴うスケール付着予測の研究に関して、開発中のシミュレータ利用の可能性についての問い合わせが来ており、平成27年7月中旬に第1回の打合せを行う予定である。

フィリピンのような地熱資源大国でもこのような技術のニーズが確認されたので、具体化すれば、今後実施する計画の国内の地熱発電所での実証試験と並行して国外での実証を進められるため、市場開拓と成果普及のための大きな推進力となることが期待される。

開発されたMS-EXCEL版でWEB上からアクセス可能なリスク評価システムについては、今後、公開に向けて準備を行う予定である。多くの発電・開発事業者、メーカー、コンサルタント等に利用されることが期待される。

開発並びに現場で実証試験を実施した腐食試験装置及びスケールによる閉塞率計測装置においては、現場導入を目指し、コスト削減や使い易さ等の視点での装置の改善が必要であり、継続検討していく必要がある。

今回使用したデータは、300℃以下の領域であり、昨今、確認されている300℃超の高温領域には対応できていない。従って、そうした高温領域での材料試験が今後必要であり、データベースの更新が必要となる。

添付資料 2

プロジェクト基本計画

「地熱発電技術研究開発」基本計画

新エネルギー部

1. 研究開発の目的・目標・内容

(1) 研究開発の目的

① 政策的な重要性

2014年4月に「エネルギー基本計画」が閣議決定され、エネルギーミックスの議論において、地熱発電の2030年度における導入見込量として最大で約155万kW（2015年度実績52万kW）、発電電力量113億kWh（2015年度実績26億kWh）の導入拡大が掲げられている。

また、2015年10月には、環境省自然環境局から出された「国立・国定公園における地熱開発の取り扱い」の通知により、これまで開発が認められていない国立・国定公園第2種及び第3種特別地域での開発が条件付きで承認され、今後、地熱資源ポテンシャルが高い同エリアでの地熱開発が、積極的に推進されていくことが予想される。

② 我が国の状況

2011年の東日本大震災以降、再生可能エネルギー導入拡大が望まれる中、世界第3位となる地熱資源ポテンシャルを有する我が国では、地熱発電に大きな期待が掛かっている。また、地熱は、太陽光や風力と異なり、安定した出力が得られるため、ベースロード電源としても注目を集めている。

近年の地熱開発では、山葵沢・秋ノ宮地域（秋田県）や安比地域（岩手県）等で大型の新規地熱開発が進捗している。またバイナリー発電においても、メディポリス指宿発電所、菅原バイナリー発電所や滝上バイナリー発電所等が運転開始している。

一方、「地熱発電の推進に関する研究会 平成28年度報告書（経済産業省）」によると、平成28年度末時点において、初期調査から開発段階にある地熱開発案件すべてを含めても出力規模が約35万kWであり、平成42年度の導入目標を達成するためには、更なる案件（約60万kW）が必要と報告されている。

また、前述のとおり、自然公園内での開発が推進されるために、環境に配慮した取り組みが必要不可欠とされるところ、開発のための具体的なルール化や環境保全対策技術の向上等、解決されるべき重要な課題は少なくない。

さらに、温泉地の中には、既存の温泉井を利用して、小規模な地熱発電を行う事例も少しずつ増えており、発電と合わせた熱利用により、地場産業（特に、農業等）の発展に貢献している成功事例もある。こうした取り組みは、地域経済の発展とともに、地熱開発事業者と温泉事業者との合意形成が困難なケースの解決策にも繋がり、温泉地で地熱開発を促進していくために、上記の成功例の実績を数多く積み上げていくことは重要と考えられる。

加えて、既存の地熱発電所の発電量低下も大きな課題となっており、それらの発電能力の回復・維持・向上に資する技術開発にも取り組むことが必要である。

こうした状況の中、エネルギーミックスにおける導入目標達成に向け、NEDOでは、平成25年度から平成29年度にかけて「新規地熱発電所の立地促進」及び「既存地熱発電所の発電能力の回復・維持・向上」に資する技術開発に取り組み、環境アセスメント手続きの迅速化に係る硫化水素拡散予測数値モデルの開発に成功するなどの成果が上がっている。

③ 世界の取組状況

再生可能エネルギーの拡大が推進されている中、地熱発電については、火山国である地熱資源を保有する米国、フィリピン、インドネシア、メキシコ、ニュージーランド、イタリア等で、国家レベルで導入拡大に向けた取組が実施され、発電設備容量や発電量は年々上昇を続けている。

例えば、アイスランドでは、電力構成比の中で地熱の占める割合は、25%と非常に高く、発電のみならず熱利用も盛んに行われており、発電及び熱利用含むエネルギー比率では、地熱の占める割合は60%となり、世界一、地熱資源を有効活用している国といえる。近年、深部高温領域をターゲットとする掘削のプロジェクト IDDP (Iceland Deep drilling Project) が実施され、成果が挙がっており、今後の動向についても注目されている。

地熱に関する国際機関であるIGA (International Geothermal Association、設立1988年) では、5年に一度国際会議 WGC (World Geothermal Congress) が開催されている(日本では、2000年に、別府および盛岡で開催)。そこでの報告によると、2014年末時点での世界の地熱発電設備容量は、26か国で12,635MWe、年間発電量は約74TWhであり、年々ほぼ線形に増加している。この5年間の増加量は、ケニア、米国、トルコ、及びニュージーランドが多い。一方、直接利用の設備容量は、70,329MWt、年間エネルギー利用量は、約163TWhであり、指数関数的な増加を示す(この中には、地中熱利用も含まれる)。

また、我が国は、JICAによりODA活動が実施され、アフリカ(ケニア、エチオピア、ジブチ等)、東南アジア(インドネシア等)、及び中南米(コスタリカ、ペルー、ボリビア、エクアドル等)のそれぞれの諸国に対して、人材育成、探査技術の技術開発、円借款等の資金提供、試掘支援等の活動を実施している。

④ 本事業のねらい

本事業では、自然公園内特別地域での地熱開発を含め、地熱発電の導入拡大を促進することを目的とし、2030年のエネルギーミックス実現に向け、我が国の地熱発電容量155万kWの達成を図る。

併せて、既存の発電所や温泉地等で未利用になっている地熱資源を、発電及び熱利用に有効に使用することにより、分散型エネルギーを確保し、地域の防災対応や経済発展の貢献に資する。

(2) 研究開発の目標

①アウトプット目標

ポテンシャルの高い地域への地熱発電の導入拡大を目的とし、既存の発電設備よりも、小型化・高効率化の地熱発電システムの機器開発及び低温域の地熱資源を活用したバイナリー発電システムを開発すると共に、環境保全対策や環境アセスメント円滑化に資する取り組みを行う。また、地熱エネルギーの高度利用化に係る技術開発を行う。なお、公募により研究開発実施者を選定後、目標の具体化等を行うこととする。

(1) 環境配慮型高機能地熱発電システムの機器開発

地熱発電システムの高効率化に資する技術（熱効率を 20%以上に向上させる技術等）を確立する。

(2) 低温域の地熱資源有効活用のための小型バイナリー発電システムの開発

未利用の温泉熱を利用した低温域のバイナリー発電について、熱効率 7%以上に資するシステムを確立するとともに、スケール対策、腐食対策、二次媒体の高性能化に係る技術を確立する。

(3) 発電所の環境保全対策技術開発

ガス漏洩防止技術や拡散シミュレーション技術、を確立する。

また、環境アセスメントにおける各種調査を最適化し、期間短縮に資する技術の開発を実施するとともに、定量的な知見に乏しい分野（硫化水素や着氷による植生への影響等）について、科学的知見を提示する（例えば、硫化水素濃度 1ppm に対する植生への影響度合いを把握する）。

加えて、自然公園内での地熱開発が円滑に進むように、必要とされる技術を確立する。

(4) 地熱エネルギーの高度利用化に係る技術開発

地熱エネルギーの高度利用化に係る技術（発電能力や利用率の回復・維持・向上のための技術、付加価値増大を実現する技術等）として、発電所の還元井延命化技術や未利用地熱エネルギーを活用可能にする技術、発電所の運転管理高度化に係る技術を確立する。具体的には、還元井の寿命を 2 倍以上にする技術の確立や、これまで未利用であった酸性熱水が噴出する地熱井のうち、pH3 までの地熱井を利用可能にする技術の確立、IoT や AI 等のイノベーション技術を活用し、発電所のトラブル発生率を 20%低減し、利用率を 10%向上させることを目指す。

②アウトカム目標

2030 年頃に、環境規制の緩和が実施された場合に、最大で約 155 万 kW の発電容量、

及び 110 億 kWh の発電量の達成が見込まれる。また、これまでのバイナリ発電システム開発成果の適用等により、多くの温泉地等で小規模地熱発電や熱利用により、地域経済の活性化も見込まれる。

③アウトカム目標達成に向けた取組

JOGMEC が実施する「地熱資源開発調査事業費助成金事業」や技術開発事業と連携し、地熱事業者の本技術開発成果の情報を提供し、成果普及に取り組む。

また、環境省、温泉事業者団体、農業関係団体等のステークホルダーとの情報交換も円滑に実施する他、系統連系に関する情報収集を行い、当研究開発事業の各テーマの検討に活用する。

(3) 研究開発の内容

上記目標を達成するために、以下の研究開発を公募により実施する。なお、実用化まで長期間を要するハイリスクな「基盤的技術」に対して、産学官の複数事業者が互いのノウハウ等を持ちより協調して実施する研究開発については、原則としてNEDO負担率 1/1 の委託で実施することとする。

① 環境配慮型高機能地熱発電システムの機器開発【平成 25 年度～26 年度】

[共同研究 (NEDO負担率: 2/3)]

- (i) 発電所の建設には、タービン、発電機、冷却塔等の各種工作物が必要であり、大規模な造成を伴い、風致景観や生物多様性に与える影響が大きいことから、環境に配慮した機器開発を行う。
- (ii) 地熱発電所においては、タービンで仕事を終えた排気は温度の高い状態で、冷却水で冷やされ、還元井に還元されているケースがある。この未利用の熱エネルギーを有効に活用するシステムを開発し、小型化・高効率化を図るための技術開発を行う。
- (iii) その他新材料の開発等による高性能化及び発電機器の高効率化に係る技術開発を行う。

② 低温域の地熱資源有効活用のための小型バイナリー発電システムの開発【平成 25 年度～29 年度】

媒体：炭化水素、代替フロン : [共同研究 (NEDO負担率: 2/3)]

媒体：アンモニア : [委託、または共同研究 (NEDO負担率: 2/3)]

- (i) 未利用の温泉熱の有効活用の観点から、特に対策が必要となるスケール対策、腐食対策等の技術の確立、二次媒体の開発、小型バイナリーサイクルの高効率化、発電システムの低コスト化等を図る。

③ 発電所の環境保全対策技術開発

[委託、または助成（NEDO負担率：1/2～2/3）]

- (i) 環境アセス時の風洞実験に代わる精度の良い硫化水素拡散予測シミュレーションモデルを開発し、環境アセスの円滑化を図る。【平成 25 年度～29 年度】
- (ii) 環境アセスメントにおける各種調査を最適化し、期間短縮に資する技術の開発を実施するとともに、定量的な知見に乏しい分野（硫化水素や着氷による植生への影響等）について、科学的知見を提示する。
- (iii) 自然公園内での地熱開発が円滑に進むように、必要とされる技術を確立する。

④ 地熱エネルギーの高度利用化に係る技術開発

[委託、または助成（NEDO負担率：1/2～2/3）]

- (i) 発電所の還元井延命化に係る技術開発
地熱発電所における還元井の還元能力の回復・維持または還元熱水の熱利用（バイナリー発電）を可能にするため技術開発を行う。
- (ii) 未利用地熱エネルギーの活用に向けた技術開発
掘削の結果、従来の方法では十分な発電量が期待できない坑井、地熱流体が酸性のため現状技術では利用できない坑井、生産井として使用していたが減衰し使用されなくなった坑井等、未利用の地熱エネルギーを活用可能にする技術開発を行う。
- (iii) 地熱発電システムにおける運転等の管理高度化に係る技術開発
IoT や AI 技術等を活用することで、出力増大、トラブル回避、人員削減等の効率化、安全衛生の向上、技術向上等に資する技術開発を行う。

⑤ 上記①～④以外で地熱発電の導入拡大に資する革新的技術開発

[委託、または助成（NEDO負担率：1/2～2/3）]

その他、地下の超高温・高圧の状態（超臨界状態）にある水を利用する地熱発電（超臨界地熱発電）の熱抽出に関する実現可能性調査等を行う。【平成 29 年度】

2. 研究開発の実施方式

(1) 研究開発の実施体制

NEDOは公募により研究開発実施者を選定する。

研究開発実施者は、企業や大学等の研究機関等（以下「団体」という。）のうち、原則として日本国内に研究開発拠点を有するものを対象とし、単独又は複数で研究開発に参加するものとする。ただし、国外の団体の特別の研究開発能力や研究施設等の活用又は国際標準獲得の観点から必要な場合は、当該の研究開発等に限り国外の団体と連携して実施することができるものとする。

プロジェクトマネージャー（以下「PM」という）に、NEDO新エネルギー部加藤久遠主任研究員を任命して、プロジェクトの進行全体を企画・管理や、そのプロジェクトに求められる技術的成果及び政策的効果を最大化させる。

（２）研究開発の運営管理

NEDOは、研究開発全体の管理・執行に責任を負い、研究開発の進捗のほか、外部環境の変化等を適時に把握し、必要な対策を講じるものとする。運営管理にあたっては、効率的かつ効果的な方法を取り入れることとし、次に掲げる事項を実施する。

①研究開発の進捗把握・管理

NEDOは、経済産業省及び研究開発実施者と緊密に連携し、研究開発の進捗状況を把握する。また、外部有識者で構成する技術検討会を組織し、定期的に技術的評価を受け、目標達成の見通しを常に把握することに努める。

②技術分野における動向の把握・分析

NEDOは、プロジェクトで取り組む技術分野について、内外の技術開発動向、政策動向、市場動向等について調査し、技術の普及方策を分析、検討する。なお、調査等を効率的に実施する観点から委託事業として実施する。

③標準化施策等との連携

地熱発電技術分野に関わりのある、国際標準化機関やフォーラムの活動概要、これらの機関における規格、ガイドライン等の検討・策定状況及びその概要、主なプレイヤーの参加状況及び日本のポジション等について調査等を行う。

④研究開発テーマの評価

研究開発を効率的に推進するため、研究開発項目④（iii）を対象として、ステージゲート方式を適用する。ステージゲート審査を実施するにあたり、PMは、外部有識者による審査を活用し、平成31年度以降の研究開発テーマの継続是非を平成31年3月までに決定する。

3. 研究開発の実施期間

本研究開発の期間は、平成25年度から平成32年度までの8年間とする。

4. 評価に関する事項

NEDOは、技術的及び政策的観点から、研究開発の意義、目標達成度、成果の技術的意義並びに将来の産業への波及効果等について、外部有識者による研究開発の中間評価を平成27年度及び30年度に、事後評価を平成33年度に実施する。また、中間評価結果を踏まえ必要に応じ研究開発の加速・縮小・中止等見直しを迅速に行う。なお、評価の時期については、当該研究開発に係る技術動向、政策動向や当該研究開発の進捗状況等に応じ

て、前倒しする等、適宜見直すものとする。

5. その他の重要事項

(1) 研究開発成果の取扱い

①成果の普及

本研究開発で得られた研究成果については、NEDO、委託先とも普及に努めるものとする。

②知的財産権の帰属

委託研究開発及び共同研究の成果に関わる知的財産権については、「国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構新エネルギー・産業技術業務方法書」第25条の規定等に基づき、原則として、すべて委託先に帰属させることとする。

③知財マネジメントに係る運用

「NEDOプロジェクトにおける知財マネジメント基本方針」に従ってプロジェクトを実施する。(委託研究のみを対象とする。ただし調査事業を除く。)

(2) 基本計画の変更

NEDOは、研究開発内容の妥当性を確保するため、社会・経済的状況、国内外の研究開発動向、政策動向、評価結果、研究開発費の確保状況、当該研究開発の進捗状況等を総合的に勘案し、達成目標、実施期間、研究開発体制等、基本計画の見直しを弾力的に行うものとする。

(3) 根拠法

本プロジェクトは、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構法第15条第1号イに基づき実施する。

6. 基本計画の改訂履歴

(1) 平成25年4月1日、制定。

(2) 平成27年9月15日、改定。

(3) 平成29年2月22日、改定。超臨界地熱発電の熱抽出に関する実現可能性調査等の追加のため。

(4) 平成30年2月13日、改定。研究開発の実施期間の延長及び研究開発項目の拡充等のため。

(5) 平成30年4月13日、改定。PM変更のため。

(別添) 研究開発スケジュール



※研究開発項目④(iii)の研究テーマについては平成30年度末にステージゲートを実施。