

「地熱発電技術研究開発」

事業原簿【公開】
(2021 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
用語集.....	用語集-1
I. 事業の位置付け・必要性について.....	I-1
I.1 NEDO の関与の必要性・制度への適合性.....	I-1
I.1.1 NEDO が関与することの意義.....	I-1
I.1.2 実施の効果.....	I-2
I.2 事業の背景・目的・位置付け.....	I-2
I.2.1 事業の背景.....	I-2
I.2.2 事業の目的、位置づけ.....	I-3
II. 研究開発マネジメントについて.....	II-1
II.1 事業の目標.....	II-1
II.2 事業の計画内容.....	II-2
II.2.1 研究開発の内容.....	II-2
II.2.2 研究開発の実施体制.....	II-3
II.2.3 研究開発の運営管理.....	II-5
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.....	II-6
II.3 情勢変化への対応.....	II-6
II.4 評価に関する事項.....	II-6
III. 研究開発成果について.....	III-1
III.1 研究開発項目毎の成果.....	III-1
III.2 知的財産等の取得、成果の普及.....	III-3
III.3 個別テーマ毎の成果(まとめ).....	III-4
IV. 実用化に向けての見通し及び取り組みについて.....	IV-1
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.....	IV-1
(1)実用化・事業化の見通し.....	IV-1
(2)実用化・事業化に向けた具体的取り組み.....	IV-2
(3)波及効果.....	IV-3

(添付資料)

添付資料 1 個別テーマについて (全 10 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	2021年10月13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/ PMおよび担当者	【新エネルギー部】 PM：主任研究員/加藤 久遠（2017年4月～現在） 担当者：主査/長谷川 真美（2021年4月～現在） 主査/和田 圭介（2019年10月～現在） 主査/石川 一樹（2021年4月～現在） 主査/本田 洋仁（2021年7月～現在）		
0. 事業の概要	(1) 地熱資源の有効活用のための「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」、「地熱エネルギーの高度利用化に係る技術開発」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：2013年度～2021年度 (9年間)		
I. 事業の位置 付け・必要性 について	<p><u>(1)政策上の位置づけ</u></p> <p>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。</p> <p>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。</p> <p>2018年7月に「第5次エネルギー基本計画」が閣議決定され、同計画において地熱発電は、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位置付けられている。エネルギーミックスにおいては、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（2017年度実績 51万kW）、発電電力量113億kWh（2017年度実績 24億kWh）の導入拡大が掲げられている。</p> <p>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。</p> <p><u>(2)NEDOが関与する意義</u></p> <p>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も利用され、新規地熱発電所の立地に大いに貢献している。</p> <p>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。</p> <p>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。</p> <p>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。</p> <p>2013年度以降、地熱分野の研究開発は、JOGMECと役割分担して進められているところ、NEDOは研究開発機関としてノウハウを有し、JOGMEC（現行事業の支援を主とした業務）にない専門性（特に、革新的技術開発など）がある。お互い連携して進めることが現状の課題解決には不可欠となる。</p>		

	<p>(3)実施の効果</p> <p>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。</p> <p>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。</p>
--	--

II. 研究開発マネジメントについて

事業の目標	<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、下記の目標を設定する。</p> <p>(1) 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認するとともに、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。</p> <p>(2) 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、未利用地熱エネルギーを活用可能にする技術、並びに発電所の運転管理高度化に係る技術を確認する。具体的には、これまで未利用であった酸性熱水が噴出する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による発電所の利用率を10%向上させることを目指す。</p>											
事業の計画内容	主な実施事項	2013 fy	2014 fy	2015 fy	2016 fy	2017 fy	2018 fy	2019 fy	2020 fy	2021 fy		
	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										
	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										
	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										
		景観デザイン・温泉計測等						環境アセスメント手法開発				
発電所の運転管理高度化												
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								
地熱エネルギーの高度利用化に係る技術開発									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	2013 fy	2014 fy	2015 fy	2016 fy	2017 fy	2018 fy	2019 fy	2020 fy	2021 fy	総額	
	一般会計	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	
	特別会計(需給)	182	619	1,349	1,415	1,138	670	778	713	30	6,893	
	開発成果促進財源	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0	
	総予算額	182	619	1,349	1,415	1,138	670	778	713	30	6,893	
	内訳	(委託)	75	455	1,164	1,379	1,133	596	693	649	27	6,172
(共同研究)負担率2/3		107	164	184	35	5	-	-	-	-	495	
(助成)		-	-	-	-	-	74	85	64	3	226	
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 新エネルギー課										

	<p>プロジェクト リーダー</p>	<p style="text-align: center;">—</p> <p>(1) 発電所の環境保全対策技術等開発 [研究目標] 環境アセスメントにおける各種調査最適化、期間短縮に資する技術の確立 (1.1) 優良事例形成の円滑化に資する環境保全対策技術に関する研究開発 ・東北緑化環境保全株式会社</p> <p>(1.2) 冷却塔排気に係る環境影響の調査・予測・評価の手法に関する研究開発 ・東北緑化環境保全株式会社 ・一般財団法人電力中央研究所 ・学校法人東京農業大学 東京情報大学 ・株式会社ガステック</p> <p>(2) 地熱エネルギーの高度利用化に係る技術開発 [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</p> <p>(2) -1 酸性熱水対策技術 (2.1) 未利用地熱エネルギーの活用に向けた坑口装置の研究開発 ・株式会社ティクス I K S</p> <p>(2.2) 未利用地熱エネルギーの活用に向けた技術開発（在来型地熱資源における未利用酸性熱水活用技術の開発） ・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MLS鋼管株式会社 ・国立大学法人京都大学</p> <p>(2.3) 酸性熱水を利用した地熱発電システム実現に向けた耐酸性・低付着技術の研究開発 ・富士電機株式会社 ・国立研究開発法人海洋研究開発機構 ・国立大学法人東海国立大学機構</p> <p>(2.4) 酸性熱水利用のための化学処理システム開発 ・西日本技術開発株式会社 ・国立大学法人九州大学 ・国立大学法人富山大学</p> <p>(2) -2 IoT-AI 適用技術 (2.5) 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 ・地熱技術開発株式会社 ・西日本技術開発株式会社 ・三菱パワー株式会社 ・学校法人早稲田大学</p> <p>(2.6) 地熱資源適正利用のためのAI-IoT温泉モニタリングシステムの開発 ・国立研究開発法人産業技術総合研究所 ・横河電機株式会社 ・地熱エンジニアリング株式会社 ・西日本技術開発株式会社</p> <p>(2.7) IoT-AI 適用による小規模地熱スマート発電&熱供給の研究開発 ・一般財団法人エンジニアリング協会 ・一般財団法人電力中央研究所 ・国立大学法人東京海洋大学 ・伊藤忠テクノソリューションズ株式会社</p>
--	------------------------	--

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）

		(2.8)地熱発電所の利用率向上に関する研究 ・東芝エネルギーシステムズ株式会社
情勢変化への対応	<p>2018年7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、本事業の事業期間をさらに3カ年延長の決定を行い、2018年度以降追加公募を実施した。なお、コロナ禍により計画通りの作業中止を余儀なくされ、最終的には、2021年度上旬まで延長した。</p> <p>2016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、2017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、2018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>2019年度より地熱発電導入促進の課題の一つである温泉事業者との共存共栄について、METI・JOGMECでは、地域共生策の支援プログラムが策定された。これを受け、NEDOで開発された温泉についての遠隔連続モニタリング装置について、METI・JOGMECからより早期の実用化の要請があり、同成果の報告を行うとともに、委託事業者の実証試験を支援した。</p> <p>内閣府で2021年4～6月に2050年のカーボンニュートラルを目指す「再エネ規制総点検タスクフォース」及び「グリーン成長戦略」において、地熱開発加速プランなどが提示された。これを受け、NEDO事業の成果である環境アセスメント手法技術や国立公園優良事例形成に向けた環境保全対策技術について、METIや環境省へプレゼンし、政策支援（NEDO成果の活用）を図った。</p>	
中間評価結果への対応	2018 年度基本計画修正	
評価に関する事項	事前評価	2012 年度実施 担当部 新エネルギー部 2012 年度実施 NEDO POST3
	中間評価	2015 年度実施 担当部 新エネルギー部 2018 年度実施 担当部 新エネルギー部
	事後評価	2021 年度実施 担当部 新エネルギー部
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(2021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、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とともに、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) 発電所の環境保全対策技術等開発</p> <p>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開発を実施するとともに、定量的な知見に乏しい分野について、科学的知見を提示する。さらに、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。</p> <p>(2) 地熱エネルギーの高度利用化に係る技術開発</p> <p>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(2021 年度)</p> <p>(1) 発電所の環境保全対策技術等開発</p> <ul style="list-style-type: none"> ➢ 従来版エコラン・マニュアルの課題を洗い出して刷新した改訂版エコラン・マニュアルとして整備した。汎用性3Dアプリを開発し、改訂版エコランセットに仕上げた。 ➢ 高性能センサの新規開発により効率的に作業可能な測定機器開発の方向性を提示できた。硫化水素や着氷影響に対する環境配慮手順等を「ガイドライン（案）」として取り 	

まとめた。

(2) 地熱エネルギーの高度利用化に係る技術開発

- ▶ 生産井の不安定化と系統除外問題をモデル化し、トラブル発生率抑制 100%、利用率向上 15%を得ることができた。
- ▶ 耐酸性を有する樹脂材料をタービン材に高強度に密着させるレーザ接合技術を確立し、酸性熱水を模擬した腐食環境下にて、16 年相当の寿命を満足することを確認した。
- ▶ 地熱発電と温泉の共生のための A I - I o T システムの具体的な仕様を決定した。想定される温泉泉質の変動要因を 100%判別可能なシステムを実現した。
- ▶ 地熱向け予兆診断システムを開発し、A 発電所の過去のトラブル事例に適用した結果、9 件中 4 件は予兆可能であることが分かり、20%以上のトラブル発生率を抑制できることを確認した。

3. 個別テーマの成果

(1) 発電所の環境保全対策技術等開発

(1.1) 優良事例形成の円滑化に資する環境保全対策技術に関する研究開発
従来版エコラン・マニュアルの課題を洗い出し大幅刷新した改訂版エコラン・マニュアルとして整備した。新たな GIS 解析方法による地熱開発適地選定の手法を作り出し、事業者から評価された具体例を「ケーススタディ」として改訂版エコラン・マニュアルに掲載した。支援アプリの性能上の課題を解決した汎用性 3 D アプリを開発し、改訂版エコランセットに仕上げた。この改訂版エコランセットを環境省、および経産省にプレゼンし、好評を得た。

(1.2) 冷却塔排気に係る環境影響の調査・予測・評価の手法に関する研究開発
高性能センサの新規開発では、より効率的に作業可能な測定機器の開発の方向性を提示できた。既存の小型連続測定器の精度向上では、最小検出感度 0.01ppm まで高められる見込みを得たとともに、実用化に向けた道筋を示せた。冷却塔排気の上昇高さは地上 200~300m 程度であることを確認できた。UAV を用いた植生指数による調査方法の手順、および着氷影響に対する環境配慮手順などを、「ガイドライン (案)」として取りまとめた。

(2) 地熱エネルギーの高度利用化に係る技術開発

(2)-1 酸性熱水対策技術

(2.1) 未利用地熱エネルギーの活用に向けた坑口装置の研究開発
常盛金用ヘッダー、および内面盛金用ヘッダー大小の導入を完了した。バルブ適用に最適と思われる盛金条件を決定した。テストピースに盛金を行い、硬度試験・曲げ試験・マクロ観察・化学成分分析を外部機関で実施した。通常盛金用ヘッダー及び内面盛金用ヘッダー(大・小)ともに、目標値を達成した。内面を耐食盛金した鍛造部品の溶接が十分な品質であることを確認するため、製品と同じ構造を持つテストピースを製作し、溶接接合部の評価を実施し、目標値を達成した。内部を盛金した鍛造部品の溶接接合して試作バルブを完成させた。本開発で製作したバルブを実際の酸性環境井戸で評価するため方針を決定した。

(2.2) 未利用地熱エネルギーの活用に向けた技術開発 (在来型地熱資源における未利用酸性熱水活用技術の開発)

金属材料腐食速度予測技術、論文データベース、経済性評価モジュールを統合したプラントリスク評価システムを完了した。5 種類の金属材料に対し、複数の高温環境下において、腐食試験を予定通り実施し、露点腐食に係る腐食データを取得した。腐食試験データを基に、回帰分析により腐食速度予測式を確立した。葛根田にて暴露試験を実施した試験片の解析結果、実験室での性能評価試験結果を踏まえ、インヒビターの適用環境、ランニングコスト評価を完了した。オリフィス配管の局所的な減肉、ならびにエルボ一部前後に局所的な減肉が発生することを再現し、更に、絶対時間をシミュレーションに組み込めるよう、腐食・スケール付着双方の実験データ取り込みの技術を確立した。葛根田での実証試験条件を対象とし、開発した重金属シミュレーションを用いたモデル化を実施し、重金属腐食条件について明確にした。

(2.3) 酸性熱水を利用した地熱発電システム実現に向けた耐酸性・低付着 技術の研究開発

耐酸性を有する樹脂材料をタービン材に高強度に密着させるレーザ接合技術を確立した。本接合は酸性熱水を模擬した腐食環境下にて、16 年相当の寿命を満足することを確認した。タービンの一般的な運用 (4 年毎の定期点検で対応可能な SCC 対策の要素技術)を確立した。炭素系のコーティング膜の構造を制御することで、スケールの主成分であるシリカの付着を低減可能な

コーティング材料および成膜技術を確立した。本コーティング材では、タービン材料と比較して、シリカの付着量を 1/8 以下とすることができた。タービンの一般的な運用（4 年毎の定期点検で対応可能なスケール対策の要素技術を確立した。タービン翼を模擬した計算モデルおよび回転試験法を確立し、タービン翼端から飛散する水滴量を推定する技術を確立した。腐食性凝縮水による腐食を防止でき、かつ、タービン効率が向上できる要素技術を確立した。

(2.4) 酸性熱水利用のための化学処理システム開発

腐食試験を行った結果、八丁原で腐食とスケール生成を共に抑制する条件として pH=4~5 を選定した。中和後のスケール生成を抑制するには、鉄イオンの反応抑制や pH のコントロールが有効であると評価した。溶射やシリカスケール、ナノバブルによるコーティング効果を確認する耐食試験の結果より、酸性熱水および NaOH 溶液への耐食効果が共に高い材質は、SUS304、Alloy825 であることが判明した。中和処理を行うことにより酸性井の稼働率を過去 2 年の平均で 87% から 96% に上げられる見込みで、モデルフィールドの酸性熱水対策としては、NaOH に一部 EDTA・4Na を添加した中和処理が有効であると評価した。

(2) -2 IoT-AI適用技術

(2.5) 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

生産井の不安定化と系統除外問題をモデル化し、トラブル発生率抑制 100%、利用率向上 15% を得ることができた。既設の地熱発電所の O&M の状況に関して要因を検討し蒸気生産量低下の発生メカニズムを分析し、坑井間の関係性の評価から対応案を提示した。定検サイクル最適化検討のための発電設備モデルおよびシミュレーション手法を確立し、坑内二相流動シミュレータの開発を行い、実際の坑井で発生する系統除外現象の解明を行った。深層畳み込みニューラルネットワーク・圧力波形予測・FFT 等による坑口圧力異常検知手法を開発して運転員に替わり、圧力急減という異常の予兆を検知する見込みを得た。

(2.6) 地熱資源適正利用のための AI-IoT 温泉モニタリングシステムの開発

地熱発電と温泉の共生のための AI-IoT システムの具体的な仕様を決定した。想定される温泉泉質の変動要因を 100% 判別可能なシステムを実現した。地熱発電が温泉へ影響を及ぼした場合に、それを検出可能な能力を有する装置を実現した。別府市所有温泉配管・施設を対象とした AI-IoT システムの構成、機能、性能等を策定した。温泉資源利活用モデル、データベース等を構築し、クラウド上へ組込可能にした。給湯システムの管理を半自動で行える AI-IoT システムを開発し、温泉資源の適正な供給に資するデータを提供可能にするとともに、温泉管理者の作業時間を現状に比して 20% 以上低減できる AI-IoT システムを開発した。温度差発電による年間 20kWh 以上の発電を実現した。

(2.7) IoT-AI 適用による小規模地熱スマート発電&熱供給の研究開発

2 か所の小規模地熱発電所の地熱流体輸送配管に IoT 機器を設置し、生産井の健全性評価を実施し、生産井の状態に起因した発電異常がないことを明らかにし、配管内におけるスケール成長の将来予測が可能であることを実証した。運営計画について簡便にシミュレーションする事業性評価支援ツールを開発し、発規模地熱発電所 2 地点に対し高い実用性、有用性があることを実証した。実証試験を実施した 2 発電所のデータに対して、開発した異常予兆検知ソフトを適用した結果、予兆検知可能なトラブル事象の件数は、実際に発生したトラブル事象の総件数の 20% 以上と試算した。また、蒸発器の異常診断を受けて修繕を早期に実施することで、暦日利用率の 10% 以上の向上が見込まれることを明らかにした。

(2.8) 地熱発電所の利用率向上に関する研究

地熱向け予兆診断システムを A 発電所の過去のトラブル事例に適用した結果、9 件中 4 件は予兆可能であることが分かり、20% 以上のトラブル発生率を抑制できることを確認した。スケール付着抑制効果の高い薬剤を選定し、A 発電所にて実蒸気を使った実証試験を行った。薬液噴霧によるスケール付着抑制効果を分析した結果、20% 以上のスケール抑制効果を確認した。

2018~2021 年度（事後評価）	
投稿論文	査読付き：5 件 その他：2 件
特 許	出願済：5 件（うち国際出願 1 件） 登録：1 件 ※特記事項は特になし

	その他の外部発表 (プレス発表等)	研究発表・講演 : 59 件 新聞・雑誌等への掲載 : 9 件 展示会への出展等 : 8 件
IV. 実用化・事業化の見通しについて	<p>冷却塔排気に係る環境影響の調査・予測・評価の手法に関する研究開発では、ガイドライン(案)の認知度を高める必要がある。高性能センサの新規開発については、実用化に向けて研究開発の継続する必要がある。そのため、補助金等を活用して、実証研究を検討する。また、積極的に学術誌・イベント等の外部発表を実施して、認知向上を図る。</p> <p>未利用地熱エネルギーの活用に向けた坑口装置の研究開発では、試作バルブを完成したが、当初目標としていた製作費に対して大幅にコストがかかる結果となった。今後の事業化に向けて、更なるコスト削減を図るため、施工時間や加工時間の短縮、および盛金厚さの見直し等の課題に取り組んでいく。</p> <p>地熱資源適正利用のためのAI-IoT温泉モニタリングシステムの開発では、開発したAI-IoTシステムのブラッシュアップを行うとともに、本システムのアウトプットをベースにした発電事業者と源泉所有者の合意形成法、温泉への影響判断のための枠組み、補償体制等を検討する。さらなる機能向上を図るとともに他分野への展開や海外マーケットの開拓を行う。</p> <p>IoT-AI適用による小規模地熱スマート発電&熱供給の研究開発では、開発成果に基づいて、多数の発電事業者、メーカーの計測データや処理・解析知見を知識データベース化することにより、国内の小規模地熱全体の効率・利用率の改善を目指す。</p>	
V. 基本計画に関する事項	作成時期	2013年4月 作成
	変更履歴	2015年9月 研究開発項目③に「高度利用化に向けた技術」を追加し改定 2017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」を追加し改定 2018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 2018年4月 PM変更のため改定 2019年2月 研究開発目的の修正および研究開発の進捗把握・運営管理に「技術開発ロードマップの策定」を追加し改定 2020年12月 研究開発期間を1年間延長のため改定

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	一對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	ある系統について、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℃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。

2018年7月に「第5次エネルギー基本計画」が閣議決定され、同計画において地熱発電は、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位置付けられ、2030年度における導入見込量として最大で約155万kW（2017年度実績51万kW）、発電電力量113億kWh（2017年度実績24億kWh）の導入拡大が掲げられている。

2012年に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かった国立・国定公園の第2種・第3種特別地域における開発が条件付きで承認され、2015年10月には、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。

今後、新規地熱発電所の立地促進にあたっては、これまで行ってきた地熱発電所の事業性向上に資する技術開発に加えて、自然公園内での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、環境アセスメントの迅速化等を目的とした技術の確立も急務となっている。

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。

2013年度以降、地熱分野の研究開発は、JOGMECと役割分担して進められているところ、NEDOは研究開発機関としてノウハウを有し、JOGMEC（現行事業の支援を主とした業務）にない専門性（特

に、革新的技術開発など)がある。お互い連携して進めることが現状の課題解決には不可欠となる。

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。

I.2 事業の背景・目的・位置付け

I.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、2019年度末までに合計56件(要確認修正)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、2019年に商業運転が開始された。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している。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、2016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、2030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（三菱パワー、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。

I.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) 発電所の環境保全対策技術等開発

発電所の環境保全対策技術として、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。

(2) 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、これまで未利用であった酸性熱水が噴出する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による発電所の利用率を10%向上させることを目指す。

表Ⅱ.1-1 研究開発目標と根拠

研究開発項目	研究開発目標	根拠
(1) 発電所の環境保全対策技術等開発	a. 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。 b. 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。	環境保全対策として、地熱事業では、環境アセスメントや国立公園内開発が重要な許認可手続きとなるが、これまで科学的な知見が乏しく、保全する管理者（環境省や自然保護団体など）の要求が高く、開発遅延の原因となっていた。
(2) 地熱エネルギーの高度利用化に係る技術開発	a. これまで未利用であった pH3 の熱水が噴出する地熱井を利用可能にする技術を確立する。 b. IoT や AI 等を活用し、発電所のトラブル発生率を 20% 低減し、利用率 10% 向上を目指す。	IoT や AI を活用し、発電能力や利用率向上や未利用酸性熱水の利活用に繋がる技術開発を実現することより、発電所の還元井延命化や発電所の運転管理を高度化できる。

II.2 事業の計画内容

II.2.1 研究開発の内容

本事業では、多くの事業が「(2) 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。

(1) 発電所の環境保全対策技術等開発

[研究目標] 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。

- (1.1) 優良事例形成の円滑化に資する環境保全対策技術に関する研究開発

[研究目標] 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。

- (1.2) 冷却塔排気に係る環境影響の調査・予測・評価の手法に関する研究開発

(2) 地熱エネルギーの高度利用化に係る技術開発

[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

- (2.1) 未利用地熱エネルギーの活用に向けた坑口装置の研究開発
- (2.2) 未利用地熱エネルギーの活用に向けた技術開発（在来型地熱資源における未利用酸性熱水活用技術の開発）
- (2.3) 酸性熱水を利用した地熱発電システム実現に向けた耐酸性・低付着技術の研究開発
- (2.4) 酸性熱水利用のための化学処理システム開発
- (2.5) 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
- (2.6) 地熱資源適正利用のためのA I - I o T温泉モニタリングシステムの開発
- (2.7) IoT-AI適用による小規模地熱スマート発電&熱供給の研究開発
- (2.8) 地熱発電所の利用率向上に関する研究

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) 発電所の環境保全対策技術等開発

[研究目標] 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。

(1. 1) 優良事例形成の円滑化に資する環境保全対策技術に関する研究開発

[委託研究(NEDO負担率：1/1)]

・東北緑化環境保全株式会社

[研究目標] 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。

(1. 2) 冷却塔排気に係る環境影響の調査・予測・評価の手法に関する研究開発

[委託研究(NEDO負担率：1/1)]

・東北緑化環境保全株式会社

・一般財団法人電力中央研究所

・学校法人東京農業大学 東京情報大学

・株式会社ガステック

(2) 地熱エネルギーの高度利用化に係る技術開発

[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

(2. 1) 未利用地熱エネルギーの活用に向けた坑口装置の研究開発

[助成事業(NEDO負担率：2/3)]

・株式会社ティクス I K S

(2. 2) 未利用地熱エネルギーの活用に向けた技術開発(在来型地熱資源における未利用酸性熱水活用技術の開発)

[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

・国立大学法人京都大学

(2. 3) 酸性熱水を利用した地熱発電システム実現に向けた耐酸性・低付着技術の研究開発

[委託研究(NEDO負担率：1/1)]

・富士電機株式会社

・国立研究開発法人海洋研究開発機構

・国立大学法人東海国立大学機構

(2.4) 酸性熱水利用のための化学処理システム開発

[委託研究(NEDO負担率：1/1)]

- ・西日本技術開発株式会社
- ・国立大学法人九州大学
- ・国立大学法人富山大学

(2.5) 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

[委託研究(NEDO負担率：1/1)]

- ・地熱技術開発株式会社
- ・西日本技術開発株式会社
- ・三菱パワー株式会社
- ・学校法人早稲田大学

(2.6) 地熱資源適正利用のためのAI-IoT温泉モニタリングシステムの開発

[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
- ・横河電機株式会社
- ・地熱エンジニアリング株式会社
- ・西日本技術開発株式会社

(2.7) IoT-AI適用による小規模地熱スマート発電&熱供給の研究開発

[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
- ・一般財団法人電力中央研究所
- ・国立大学法人東京海洋大学
- ・伊藤忠テクノソリューションズ株式会社

(2.8) 地熱発電所の利用率向上に関する研究

[助成事業(NEDO負担率：2/3)]

- ・東芝エネルギーシステムズ株式会社

II. 2. 3 研究開発の運営管理

地熱発電所開発への期待が高まる社会情勢を鑑み、追加公募を複数回実施する等、時勢を捉えた新しい手法や取り組みを新規に採択（特に環境保全対策技術）。また、当該事業の進め方・あり方について、外部有識者による検討委員会をNEDOにて設置し、これまでの開発項目のみならず、新たな開発項目に関しての議論も実施した（特に後継事業のテーマ探索など）。

2018年度の間評価結果を以下のとおり反映した。

- ① 2019年度に地熱技術を俯瞰した地熱技術戦略を策定し、2021年度以降の新規事業のテーマ探索・シナリオ策定を実施した。特に、NEDOは、これまで地上のみ課題が主体であったが、利用率向上には、地下の課題解決が重要であり、こちらも関与出来ることとなった。NEDOの成果をJOGMECでフォローすることを提案し、適宜協議を行っている。
- ② 2021年度より、地熱を含む再エネの実用化実証試験プログラムがスタートした。これらはより実用化に近い段階のテーマを対象とする（実用化支援）もので、こちらで研究開発後の事業化までの期間の一部をフォローアップ出来ることとなった。
- ③ 硫化水素予測については、稼働中の発電所において、実測値と予測モデル結果との検証を実施し、実際の現象を再現することが可能となった。今後さらに精度向上を図る予定である。エコランでは、現行の地熱調査や開発地域をモデルフィールドとして、優良事例形成への有効性の検証を実施した。現在、環境省へ説明し、同手法のガイドラインへの引用を協議中である。地域共生プログラムについても調査中であり、準備でき次第、開始する予定である。
- ④ 地熱開発による温泉影響については、現状技術では数値モデルでの立証は課題が多く、地熱開発の影響についての実証試験を行うのみに限定した。今後、得られたデータを地熱開発事業者、温泉関係者、第三者機関などで地道な議論していくことが肝要となる。なお、地熱開発以外の変動要因解析は計画どおり完了した。

2018年度に「運転等高度化技術」に対してステージゲート審査を実施し、以下の対応を行った。

- ① ヒアリングにより得られた現場の課題を整理し、課題解決可能なテーマを選定してその解決に向け取り組んだ。井戸から地上設備を通して発電システムを網羅する統合的なシステムを構築するが、ここのシステムが連携して、利用率を引き上げられるような課題解決手法を提示した。
- ② 実証試験場所の追加やデータ収集の加速化を実施した。データ収集が出来ないところでは、IoTデータ転送システムを導入した。バイナリー発電は、所内率が入った発電出力となり、火原協の式をそのまま使用出来ないため、補正した式を導入して、評価することとした。

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

地熱学会学術講演会オーガナイズドセッション（2020年度）にて成果の進捗について報告し、第三者と多くの意見交換（特に今後必要となる技術開発テーマなど）を行うとともに、成果普及のためのアピールを実施した。

日本地熱協会と技術交流会を開催し、成果が得られている超臨界地熱資源量評価や革新的探査技術などの各テーマの紹介を行うとともに、2021年度以降の新規テーマについて意見交換を行い、地熱事業に関わる会社関係者から要望等（例えば、JOGMECとの連携強化や、地域共生の方策など）を受けた。

JOGMECと2018年度以降、定期的に連絡会を実施し、お互いの事業について情報交換を行い、NEDO事業の成果の継承などを議論した。特に温泉モニタリング機器については、JOGMEC事業で活用したいとのことで、関係メーカーと協議を開始した。

成果普及を促進するため、研究開発成果を解説書（マニュアルなど）により公表するとともに、ニュースリリースを実施した。

II. 3 情勢変化への対応

2018年7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、本事業の事業期間をさらに3カ年延長の決定を行い、2018年度以降追加公募を実施した。なお、コロナ禍により計画通りの作業中止を余儀なくされ、最終的には、2021年度上旬まで延長した。

2016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、2017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、2018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。

2019年度より地熱発電導入促進の課題の一つである温泉事業者との共存共栄について、METI・JOGMECでは、地域共生策の支援プログラムが策定された。これを受け、NEDOで開発された温泉についての遠隔連続モニタリング装置について、METI・JOGMECからより早期の実用化の要請があり、同成果の報告を行うとともに、委託事業者の実証試験を支援した（ニュースリリースなど）。

内閣府で2021年4～6月に2050年のカーボンニュートラルを目指す「再エネ規制総点検タスクフォース」及び「グリーン成長戦略」において、地熱開発加速プランなどが提示された。これを受け、NEDO事業の成果である環境アセスメント手法技術や国立公園優良事例形成に向けた環境保全対策技術について、METIや環境省へプレゼンし、政策支援（NEDO成果の活用）を図った。

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2021年度に実施する。

III. 研究開発成果について

III.1 研究開発項目毎の成果

(1) 発電所の環境保全対策技術等開発

研究開発項目（1）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 に示す。

表 III. 1-1 最終目標の達成度

最終目標	成果	達成度	目標達成のために解決されるべき課題
<p>①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。</p> <p>②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認する。</p>	<p>①新たなモニタリング調査手法として、UAV を用いた植生指数によるモニタリング調査方法の手順、および着氷影響に対する環境配慮手順などを「ガイドライン（素案）」として取り纏めた。また、測定器や硫化水素モニタリングの現状および課題等を明らかにした。また、測定の際に干渉する火山性ガスの成分を明らかにした。</p> <p>②改訂版エコラン・マニュアルに、掘削機械に関する環境配慮事例、新たに 2 パタン追加したパタン参考集、新たな GIS 解析方法による地熱開発適地選定の手法、およびケーススタディを追加掲載した。併せて環境省、経産省等に対して、改訂版エコランセットをプレゼンし、好感触を得、検討会資料に同マニュアルが掲載された。</p>	<p>◎</p> <p>◎</p>	—

◎大きく上回って達成、○達成、△一部達成、×未達

(2) 地熱エネルギーの高度利用化に係る技術開発

研究開発項目 (2) 地熱エネルギーの高度利用化に係る技術開発の最終目標に対する成果と達成度を表Ⅲ. 1-2に示す。

表Ⅲ. 1-2 最終目標の達成度

最終目標	成果	達成度	目標達成のために解決されるべき課題
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を確立する。	<ul style="list-style-type: none"> ・レーザー溶接機を導入し、内面を耐食盛金した鍛造部品の溶接が十分な品質であることを確認するため、製品と同じ構造を持つテストピースを製作、溶接接合部の評価を実施し、目標値を満たす結果となった。また、内部を盛金した鍛造部品の溶接接合し、試作バルブを完成させた。 ・地熱発電プラントリスク評価システムを構成する機能として、腐食速度予測技術、論文データベース、経済性評価モジュール、ならびに、腐食速度データのグラフ表示機能をもつ、統合型システムを開発した。 ・炭素系のコーティング膜の構造を制御することで、スケールの主成分であるシリカの付着を低減可能なコーティング材料および成膜技術を確立した。本コーティング材では、タービン材料と比較して、シリカの付着量を 1/8 以下とすることができた。 ・モデルフィールドの酸性熱水対策としては NaOH に一部 EDTA・4Na を添加した中和処理が有効である。そのための設備の概念設計を行った結果、10 年以内に設備費の回収が見込める。 	<p>○</p> <p>○</p> <p>○</p> <p>○</p>	—
IoT や AI 等のイン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。	<ul style="list-style-type: none"> ・地熱向け予兆診断システムを A 発電所の過去のトラブル事例に適用した結果、9 件中 4 件は予兆可能であることが分かり、20% 以上のトラブル発生率を抑制できることを確認した。 ・対象地熱発電所をベースとした模擬モデルにおいて、S 発電所で実際に生じている生産井の不安定化と系統除外問題をモデル化してトラブル発生率抑制 100%、利用率向上 15% を得ることができた。 ・回帰学習型 AI および統計数学の原理に基づく温泉データ解析手法を検討し、それらを比較的容易に利用可能にするソフトウェアパッケージを開発した。大分県別府市所有温泉配管を対象に、給湯システムの管理を、クラウドを介して 	<p>○</p> <p>○</p> <p>○</p>	—

	<p>半自動で行えるAI-IoTシステムを開発し、温泉管理者の作業時間を現状に比して20%程度低減できるAI-IoTシステムのプロトタイプを実現した。</p> <p>・エネルギーマネジメントプラットフォーム（EMP）プロトタイプを構築した。データに整理・登録・検証を通じて、小規模地熱発電所におけるEMPの課題点やあるべき姿に関して整理した。AIを適用した地熱発電に関わる計測データ等の予測解析を実施し、発電量、スケール厚さ、異常予兆等の予測において適用可能な事例を示した。</p>	○	
--	---	---	--

◎大きく上回って達成、○達成、△一部達成、×未達

III.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.2-1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.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
2018FY	0件	0件	0件	0件	0件	4件	1件	1件
2019FY	1件	0件	0件	0件	0件	23件	8件	7件
2020FY	3件	0件	1件	4件	2件	27件	0件	0件
2021FY	0件	0件	0件	1件	0件	5件	0件	0件
合計	4件	0件	1件	5件	2件	59件	9件	8件

(※Patent Cooperation Treaty：特許協力条約)

2021年8月24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.3 個別テーマ毎の成果(まとめ)

(1) 発電所の環境保全対策技術等開発

表Ⅲ.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) 優良事例形成の円滑化に資する環境保全対策技術に関する研究開発				
研究開発項目	最終目標	研究開発成果	達成度	目標達成のために解決すべき課題
① 既存事業地の自然環境情報、環境配慮事例の整理	環境配慮事例集の作成	・改訂版エコラン・マニュアルに、掘削機械に関する環境配慮事例を掲載した。 ・従来版パターン参考集(100パタンの環境配慮事例が掲載済み)に、新たに2パターン追加し、改訂版パターン参考集として整備した。	◎	—
② エコランセットの試験運用、環境配慮事例の検討	ケーススタディ集の作成	・新たなGIS解析方法による地熱開発適地選定の手法を作り出し、改訂版エコラン・マニュアルに掲載した。委員の評価も得た。 ・試験運用で、事業者から評価された具体例を「ケーススタディ」として改訂版エコラン・マニュアルに掲載した。	◎	—
③ 既存事業地の成果と試験運用結果の比較検証	エコランセット解説(仮称)の作成	・従来版エコラン・マニュアルの課題を洗い出し、地熱関係地熱開発段階別の目次構成とし、地表・坑井調査段階の望ましい自然環境調査の例示、3Dアプリとの連動性向上等を達成した。 ・支援アプリの性能限界の課題を解決するため、無償版のゲーム制作用アプリケーション(Unreal Engine4)をベースとして汎用性3Dアプリを開発した。	◎	—
④ 優良事例形成に係る先進技術の有効性評価	エコランセットの理解を深めるため、報告書の公表、学会等での成果発表	改訂版エコランセットを完成し、委員会、3事業者より好評を得た。また、JOGMEC、環境省、経産省に対して、改訂版エコランセットをプレゼンし、好感触を得た。	◎	学会等の公式発表

(1.2) 冷却塔排気に係る環境影響の調査・予測・評価の手法に関する研究開発				
研究開発項目	最終目標	研究開発成果	達成度	目標達成のために解決すべき課題
① 硫化水素拡散予測の最適化	・硫化水素の人への影響評価で、事業者負担を軽減できる調査・予測・評価の手法を提案する。 ・高性能センサ開発で、下限値0.004ppmの性能を達成する目的を得る。 ・下限値0.01~0.04ppmの性能を有する試作機を作製する。 ・気象観測高度500m未満程度でも、予測・評価に支障が生じない場合があることを明らかにする。 ・開発を進める硫化水素測定器を用いて、効率的/効果的な硫化水素測定の方法を検討する。	・野外における拡散実態の実測値と比較することにより、適切な使い分けなどの考え方を「ガイドライン」として取りまとめた。 ・高性能センサの新規開発では、より効率的に作業が可能な測定機器の開発の方向性を提示できた。 ・既存の小型連続測定器の精度向上では、最小検出感度0.01ppmまで高められる見込みを得るとともに、実用化に向けた道筋を示せた。 ・考慮すべき冷却塔排気の上昇高さは地上200~300m程度であることを確認できた。 ・開発中の測定機器の実用化を見越し、測定手法の基本的な考え方を「あり方(素案)」として取りまとめた。	◎	—
② 硫化水素による植生への影響の評価手法	・硫化水素による植物影響の有無や程度を把握し、知見を取りまとめる。 ・運転開始後のモニタリング調査において、効率的に把握する新たなモニ	・マルチスペクトルカメラ搭載UAVを用いた樹冠レベルの観測により、硫化水素による植生への影響について、植生指数を用いて把握できる可能性を示す結果を得ることができた。 ・新たなモニタリング調査手法として、UAVを用いた植生指数による調査方法の手順などを「ガイドライン(素案)」として取りまとめた。	◎	—

	タリング調査手法を提案する。			
③ 蒸気による樹木の着氷影響の予測・評価手法	・冷却塔から排出される蒸気による樹木への着氷影響についての予測・評価の手法を提案する。	・野外実験により着氷現象を確認し、その結果を基に、実務上十分な精度を有する着氷影響の予測手法を開発した。 ・着氷影響に対する環境配慮手順などを、「ガイドライン(案)」として取りまとめた。	◎	—

(2) 地熱エネルギーの高度利用化に係る技術開発

表Ⅲ. 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) 未利用地熱エネルギーの活用に向けた坑口装置の研究開発				
研究開発項目	最終目標	研究開発成果	達成度	目標達成のために解決すべき課題
① レーザー溶接機の導入及び溶接盛金条件の確立	・通常盛金及び内面盛金の評価を可能にする。	・通常盛金用ヘッダー導入完了。 ・内面盛金用ヘッダー大小の導入を完了。	○	—
② 盛金の評価	・通常盛金ヘッダーで盛金したテストピース、および内径用ヘッダーで、盛金評価を実施し、次の項目において基準を合格する(引張試験、曲げ試験、硬度測定、外観観察、化学成分分析)。	・バルブ適用に最適と思われる盛金条件を見だし、評価。テストピースに盛金を行い、硬度試験・曲げ試験・マクロ観察・化学成分分析を外部機関で実施した。通常盛金用ヘッダー及び内面盛金用ヘッダー(大・小)ともに、目標値を満たす結果となった。	○	—
③ 実地試験用バルブ製作	・試作バルブを設計/製作し、次の項目において基準を合格する(引張試験、曲げ試験、硬度測定、外観観察)。	・内面を耐食盛金した鍛造部品の溶接が十分な品質であることを確認するため、製品と同じ構造を持つテストピースを製作、溶接接合部の評価を実施し、目標値を満たす結果となった。また、内部を盛金した鍛造部品の溶接接合して試作バルブを完成させた。	○	—
④ 実地試験場所調査・選定	・実地試験場所を1件選定する。	・本開発で製作したバルブ(開発項目3)を実際の酸性環境井戸で評価するために、関連企業と検討し、実地試験場所を、1件選定した。	○	—

(2.2) 未利用地熱エネルギーの活用に向けた技術開発（在来型地熱資源における未利用酸性熱水活用技術の開発）				
研究開発項目	最終目標	研究開発成果	達成度	目標達成のために解決すべき課題
① 最適材料選定に係る技術開発	<ul style="list-style-type: none"> 高温（300～370℃）、pH<3.0 環境での腐食材料試験、腐食予測式を組み込んだ材料選定チャートを開発 	<p>【高温・低 pH 環境下における既存材料選定の研究】</p> <ul style="list-style-type: none"> 地化学シミュレーションにより高温での pH 近似式を確立した上で、腐食試験データを基に、回帰分析により腐食速度予測式を確立した。また、材料選定チャートの改良を行った。 	○	—
② 薬注法・シミュレーションによる腐食対策技術開発	<ul style="list-style-type: none"> 高温（300～370℃）、pH<3.0 に対応した対策手法の反映および腐食防止効果を高める予測技術の開発する 	<p>【既存金属材料に係る腐食データベースの整備】</p> <ul style="list-style-type: none"> 論文のデータベース化検索プログラム製作を完了し、リスク評価システムへ反映した。 金属材料腐食重量変化、化学組成変化より Cr 当量を用いた腐食速度予測式の改良を実施。 <p>【高温・低 pH 環境における金属材料腐食試験】</p> <ul style="list-style-type: none"> 5 種類の金属材料に対し、150℃、250℃、300℃、350℃腐食試験を実施。 過熱蒸気井（米国ガイザーズ）での腐食試験により、露点腐食に係る腐食データを取得した。 <p>【実坑井試験によるインヒビターの腐食防止効果の検証】</p> <ul style="list-style-type: none"> 葛根田地域還元熱水を使用し、選定したインヒビターに係る性能評価試験を実施した。 インヒビター濃度の変化に伴う、腐食速度に係るデータ、クーポン状況に係るデータを取得した。 <p>【腐食シミュレーションによる予測技術の開発】</p> <ul style="list-style-type: none"> オリフィス配管の局所的な減肉、ならびにエルボ一部前後に局所的な減肉が発生することを再現した。また、絶対時間をシミュレーションに組み込めるよう、腐食・スケール付着双方の実験データ取り込みの技術を確立した。 葛根田での実証試験条件を対象とし、開発した重金属シミュレーションを用いたモデル化を実施。Sb, As の生成機構を解析し、重金属腐食条件について明らかにした。 	○	—
③ 酸性熱水に対応した地熱発電プラントリスク評価システムの開発	<ul style="list-style-type: none"> 高温（300～370℃）、pH<3.0 に対応したプラントリスク評価システムを開発し、Web 公開する。 	<ul style="list-style-type: none"> 地熱発電プラントリスク評価システムを構成する機能として、腐食速度予測技術、論文データベース、経済性評価モジュール、ならびに、腐食速度データのグラフ表示機能を開発した。 各モジュールは、新たに Visual Basic C#によるソフトウェア化を行い、システムの統合化を完了した。 開発した地熱発電プラントリスク評価システムを用い、過去の事例による腐食速度・経済性評価等の検証を行った。 	○	—

(2.3) 酸性熱水を利用した地熱発電システム実現に向けた耐酸性・低付着技術の研究開発				
研究開発項目	最終目標	研究開発成果	達成度	目標達成のために解決すべき課題
① 材料に対して腐食環境遮断を行う「レーザを用いた金属/フッ素樹脂直接接合」	フッ素樹脂接合技術により ・酸性熱水環境にて腐食寿命を1000時間以上 ・界面剥離をなくす ・施工コスト5万円/本以下	・耐酸性を有する樹脂材料をタービン材に高強度に密着させるレーザ接合技術を確立した。 ・本接合は酸性熱水を模擬した腐食環境下にて、16年相当の寿命を満足することを確認した。タービンの一般的な運用(4年毎の定期点検で対応可能な SCC 対策の要素技術を確立できた。	○	—
② スケール非付着化のための「炭素系薄膜による低付着表面改質技術」	・炭素膜によるシリカ付着抑制により ・スケール付着量を従来比で1/8以下 ・施行コスト10万円/本以下	・炭素系のコーティング膜の構造を制御することで、スケールの主成分であるシリカの付着を低減可能なコーティング材料および成膜技術を確立した。 ・本コーティング材では、タービン材料と比較して、シリカの付着量を1/8以下とすることができた。タービンの一般的な運用(4年毎の定期点検)で対応可能なスケール対策の要素技術を確立できた。	○	—
③ 腐食の要因となる蒸気中の水滴の高効率捕集のための「粒子法による水滴挙動計算」	ドレン排出構造の最適化： 腐食性凝縮水捕集量 \geq 10%	・タービン翼を模擬した計算モデルおよび回転試験法を確立し、タービン翼端から飛散する水滴量を推定する技術を確立した。腐食性凝縮水による腐食を防止でき、かつ、タービン効率が向上できる要素技術を確立できた。	○	—

(2.4) 酸性熱水利用のための化学処理システム開発				
研究開発項目	最終目標	研究開発成果	達成度	目標達成のために解決すべき課題
① 酸性熱水の化学処理技術開発	・薬剤注入管、地上配管の腐食を抑制すると共に、薬剤添加後にスケールが生成しない条件を提案する。	・腐食抑制剤や中和に関する試験を行った結果、八丁原で腐食とスケール生成を共に抑制する条件として pH=4~5 を選定。 ・中和後のスケール生成を抑制するには、鉄イオンの反応抑制や pH のコントロールが有効。 ・熱水の化学組成によっても異なるが、鉄イオンの反応抑制には EDTA・4Na 等、中和処理後に中性熱水と混合する場合には緩衝作用のある EDTA・4Na、酢酸 Na、シュウ酸 Na、中和地点近傍の局所的な pH 上昇によるスケールを抑制するにはシュウ酸 Na や酢酸 Na の添加が有効。	○	—
② 材料コーティングによる防食技術開発	・薬注管の内外において、腐食が抑制できる条件(配管材質、調整後の熱水 pH 等)を提案する。	・溶射(Ni4種合金、Ti、50Ni50Cr)やシリカスケール、ナノバブルによるコーティング効果を確認する耐食試験の結果より、酸性熱水および NaOH 溶液への耐食効果が共に高い材質は、SUS304、Alloy825 に次いで溶射材(Ni4種合金)であった。 ・Ni4種合金溶射は、酸性熱水中でもシリカのコーティング効果が得られ、耐食効果が持続することが期待できる。	○	—
③ 酸性熱水利用システム設計	・年間のシステム稼働率が80%以上で、かつ、経済性のある(導入費用やランニング費用の総コストより発電電力量アップによる売上げが上廻る)システム設計を提案する。	・中和処理を行うことにより酸性井の稼働率を過去2年の平均(定修を除く)87%から96%に上げられる見込み。 ・モデルフィールドの酸性熱水対策としては NaOH に一部 EDTA・4Na を添加した中和処理が有効である。そのための設備の概念設計を行った結果、10年以内に設備費の回収が見込める。	○	—

(2.5) 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				
研究開発項目	最終目標	研究開発成果	達成度	目標達成のために解決すべき課題
④ 全体システム設計	<ul style="list-style-type: none"> ・トラブル発生率20%抑制 ・利用率10%向上 	<ul style="list-style-type: none"> ・対象地熱発電所をベースとした模擬モデルにおいて、S発電所で実際に生じている生産井の不安定化と系統除外問題をモデル化してトラブル発生率抑制100%、利用率向上15%を得ることができた。 	○	—
⑤ 蒸気・熱水輸送設備（坑井、蒸気・熱水輸送設備等）のO&Mの最適化	<ul style="list-style-type: none"> ・利用率低下を招いている現象のメカニズムについて解明する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・S発電所のデータについて、地上設備の運転データを使った坑井間の関係性を評価し対応案を検討した。地熱発電所のO&Mにおける蒸気生産量低下のメカニズム分析から有効な具合の把握方法を体系化して、S発電所のデータで坑井間の関係性の評価から対応案を提示した。 	○	—
⑥ 地熱発電設備（タービン・発電機、復水器、冷却塔等）のO&Mの最適化	<ul style="list-style-type: none"> ・タービンノズル閉塞などの問題に対して発電設備側の定検頻度の合理化を図る。 	<ul style="list-style-type: none"> ・既設の地熱発電所のO&Mに関して要因を検討しトラブル発生メカニズム分析から不具合の把握方法を体系化した。対象地熱発電所のデータに基づき、定検サイクル最適化検討のための発電設備モデルおよびシミュレーション手法を確立して最適値を得られることを確認した。 	○	—
⑦ 蒸気生産ネットワークシミュレータの開発	<ul style="list-style-type: none"> ・坑口条件を変化させた場合のタービン入口での蒸気条件を計算する。 ・生産井の系統除外現象に対する坑内での流動メカニズムを解明する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・坑内二相流動シミュレータ（定常、非定常）の開発を行い、実際の坑井で発生する系統除外現象の解明を行った。 ・蒸気生産ネットワーク全体としては、坑内シミュレータとEnergy-WINの併用によって模擬計算可能である見通しをつけた。 	○	S発電所の不安定な生産井のO&Mの最適化には、貯留層の変動が大きく関わっており、貯留層も含めた解析実施が必要。
⑧ 地熱特有のM2Mセンサ技術の開発	<ul style="list-style-type: none"> ・トラブル発生率抑制・利用率向上に寄与するセンサ技術を選定して、適用性を明らかにする。 ・圧力・温度など既存のセンサについて、IoT化に必要な周辺技術をまとめる。 	<ul style="list-style-type: none"> ・M2Mセンサ技術の現状調査（メーカーヒアリング）と地熱環境で利用可能なセンサ技術調査を実施して、完全な二相流量測定には未だ技術開発が必要であること、弁開度計測は既存の技術が適用可能であることが判明した。 	○	—
⑨ AI技術を活用した地熱発電設備O&Mの最適化	<ul style="list-style-type: none"> ・大幅な利用率低下を招いている生産井の系統除外問題について、現象発生12時間前程度に警告が得られて運転員が対応可能なシステムを開発する。 ・ドローンや新しいセンサ技術（振動計）などの情報からO&Mに有用な情報を入手する技術を開発する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・蒸気・熱水系合流蒸気制御系の推定システムとして深層畳み込みニューラルネットワークや圧力波形予測（ARDCNNモデル）による坑口圧力異常検知手法を開発して運転員に替わり、圧力急減という異常の予兆を検知する見込みを得た。 ・ドローンによる配管点検システムを開発した。 ・振動する生産井での圧力急減異常を予兆することができた。 	○	<ul style="list-style-type: none"> ・振動計の利用については、坑井の変化を検知できる見込みがしたが、観測期間中に圧力急減現象に遭遇しなかったことから、有効性の検証については今後の課題とする。

(2.6) 地熱資源適正利用のためのAI-IoT温泉モニタリングシステムの開発				
研究開発項目	最終目標	研究開発成果	達成度	目標達成のために解決すべき課題
① 地熱発電と温泉の共生のためのAI-IoTシステムの開発	地熱開発（地熱発電所）が温泉に与える影響の定量評価が可能なシステムを開発し、温泉泉質（流量、温度等）の変動要因を60%以上判別可能なシステムを実現する。	<ul style="list-style-type: none"> ・帰帰学習型 AI および統計数学の原理に基づく温泉データ解析手法を検討し、それらを比較的容易に利用可能にするソフトウェアパッケージを開発した。 ・開発したソフトウェアの性能をシミュレーションにより評価し、想定した性能を有することを確認した。 ・上記ソフトウェアにより、実証試験地で取得したデータを解析した結果、各地点で想定される温泉の変動要因の全てを検出、除去可能であることを示した。 ・温泉と地熱発電の共生のためのAI-IoT温泉モニタリングシステムの今後の普及方法について検討を行い、方向性を示した。 	○	—
② 温泉資源適正利用のためのAI-IoTシステムの開発	温泉資源の適正な供給に資するデータを提供可能にするとともに、温泉資源適正利用により、温泉管理者の作業時間を現状に比して20%程度低減できるAI-IoTシステムを実現する。	<ul style="list-style-type: none"> ・既開発の温泉モニタリング装置の機能向上を実現した。 ・大分県別府市所有温泉配管を対象に、給湯システムの管理を、クラウドを介して半自動で行えるAI-IoTシステムを開発し、給湯の健全性評価や余剰資源量の提示等を可能にした。これにより温泉管理者の作業時間を現状に比して20%程度低減できるAI-IoTシステムのプロトタイプを実現した。 ・別府市所有温泉配管を利用した温度差発電試験を実施し、年間20kWh以上の発電を実現可能であることを示した。 ・「温泉資源の適正管理・利用AI-IoTシステム」のシステム構成、ビジネスモデル、運用方法を策定した。 	○	—

(2.7) IoT-AI適用による小規模地熱スマート発電&熱供給の研究開発				
研究開発項目	最終目標	研究開発成果	達成度	目標達成のために解決すべき課題
① 既存井戸の評価・モニタリング	既存井戸および配管のスケールの評価・モニタリングに関するEMPのプロトタイプを改良した基本ツールを用いて実証試験を実施し、井戸の健全性と配管のスケール特性を評価/実証する。	<ul style="list-style-type: none"> ・2か所の小規模地熱発電所において、生産井の健全性を評価し、生産井の状態に起因した発電異常がないことを明らかにした。 ・2か所の小規模地熱発電所の地熱流体輸送配管にIoT機器を設置し、配管内におけるスケール成長の将来予測が可能であることを実証した。 	○	—
② 事業性評価・運営	既設事業の事業コストやリードタイムを対象にして地域経済効果と事業プロセスを可視化し、社会コスト低減の最適化を図る。	<ul style="list-style-type: none"> ・収益改善に関して、事業利益を最大化する為に、点検や修理に係る運営計画について、事業者自らが簡便にシミュレーションできる「事業性評価支援ツール」を開発した。 	○	—
③ 運転管理	<ul style="list-style-type: none"> ・発電関連設備等の計測データの可視化、及び、性能解析・評価を可能とする運転管理支援ツールを作成し、過去に生じたトラブル事例を対象にして、20%以上の異常予兆検知が可能であることを確認する。 	<ul style="list-style-type: none"> ・エネルギーマネジメントプラットフォーム（EMP）プロトタイプを構築した。 ・データに整理・登録・検証を通じて、小規模地熱発電所におけるEMPの課題点やあるべき姿に関して整理した。 ・AIを適用した地熱発電に関わる計測データ等の予測解析を実施し、発電量、スケール厚さ、異常予兆等の予測において適用可能な事例を示した。 	○	—
④ IoT-AIシステム化	EnergyWin TM 、Predict-ITあるいはReNomを効果的に活用したツール（基本ツール）とE-PLSMとの相互インターフェースを作成し、システム化による効率低下が発生していないことを確認する。	<ul style="list-style-type: none"> ・エネルギーマネジメントプラットフォーム（EMP）プロトタイプを構築した。 ・データに整理・登録・検証を通じて、小規模地熱発電所におけるEMPの課題点やあるべき姿に関して整理した。 ・AIを適用した地熱発電に関わる計測データ等の予測解析を実施し、発電量、スケール厚さ、異常予兆等の予測において適用可能な事例を示した。 	○	—

(2.8) 地熱発電所の利用率向上に関する研究				
研究開発項目	最終目標	研究開発成果	達成度	目標達成のために解決すべき課題
① ビッグデータ解析技術を活用した予兆診断	・トラブルの発生率を20%低減	・地熱向け予兆診断システムをA発電所の過去のトラブル事例に適用した結果、9件中4件は予兆可能であることが分かり、20%以上のトラブル発生率を抑制できることを確認した。	○	—
② 稼働率を下げるスケールに対する対策	・スケール付着量を20%抑制	・スケール付着抑制効果の高い薬剤を選定し、A発電所にて実蒸気を使った実証試験を行った。薬液噴霧によるスケール付着抑制効果を分析し、20%以上のスケール抑制効果を確認した。	○	—

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発電所の環境保全対策技術等開発

優良事例形成の円滑化に資する環境保全対策技術に関する研究開発では、環境配慮を検討する際、改訂版パタン参考集を活用することで、的確かつ迅速に対応でき、許認可申請の参考資料としてそのまま活用できる。また、改訂版エコラン・マニュアルに「ケーススタディ」が掲載されたことで、事業者を受け入れられることや、事業の活用場面に合わせた目次構成、用語解説の新設、法令との関連箇所の明記、資源調査段階の自然環境調査の例示など、事業者やその他地熱関係者に理解しやすい内容となり、共通認識の醸成に寄与することが期待される。さらに、JOGMEC、環境省、経産省の担当部署、研究に協力された3事業者から好感触を得ており、今後、事業者を活用されることが十分に期待される。

冷却塔排気に係る環境影響の調査・予測・評価の手法に関する研究開発では、開発成果である硫化水素拡散予測モデルに関する「ガイドライン(案)」は、実用化可能な段階と考える。公表後、環境アセスメントを実施する案件での適用が期待される。また、高性能センサの新規開発については、実用化は可能だが、今後10年近くの研究継続が必要と考える。

高層気象観測の最適化については、複数地点での現地検証を重ねることができれば、実用化が見込まれる。さらに、簡易な硫化水素測定器の開発のうち、既存の小型連続測定器の精度向上について、実用化された後、実用化が見込まれる。樹木への着氷影響に関する「ガイドライン(案)」は、実用化可能な段階と考える。公表後、環境アセスメントを実施する案件での適用が期待される。

②高度利用化技術開発

未利用地熱エネルギーの活用に向けた坑口装置の研究開発では、試作バルブを完成したが、当初目標としていた製作費に対して大幅にコストがかかる結果となった。今後の事業化へ向けて、更なるコスト削減を図るため、施工時間や加工時間の短縮、および盛金厚さの見直し等の課題に取り組んでいく。

未利用地熱エネルギーの活用に向けた技術開発では、開発したプラントリスク評価システムを利用すれば、地熱開発事業者にとって、酸性熱水資源の利用方針を決定する一助となることが期待される。今後、フロー式ポータブル材料試験装置を用いた現地腐食試験、腐食シミュレーション等のコンサルタント業務、およびケーシングを始めとした販売事業につなげていく事を目指す。

酸性熱水を利用した地熱発電システム実現に向けた耐酸性・低付着技術の研究開発では、実用化に向け、レーザを用いた樹脂/金属接合、および炭素膜による低付着表面改質等、実機形状への適用技術を確認した後、実証による性能評価を行う計画である。

酸性熱水利用のための化学処理システム開発では、実証試験可能な生産井を確保して実用化試験を行い、薬剤注入管の耐久性などを確認する。また、他の薬剤についても検討を進め、より経済性の良いシステムへの改良を行い、導入拡大に努める。

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では、NEDOでの研究成果も取り込んだ上で、地下も含めた課題を総合的に取り扱うことが可能なAI技術を活用した地熱発電設備O&Mの最適化技術として「地熱発電システムの持続可能性を維持するためのIoT-AI技術」の完成を目指す。

地熱資源適正利用のためのAI-IoT温泉モニタリングシステムの開発では、開発したAI-IoTシステムのブラッシュアップを行うとともに、本システムのアウトプットをベースにした発電事業者と源泉所有者の合意形成法、温泉への影響判断のための枠組み、補償体制等を検討する。さらなる機能向上を図るとともに他分野への展開や海外マーケットの開拓を行う。

IoT-AI 適用による小規模地熱スマート発電&熱供給の研究開発では、開発成果に基づいて、多数の発電事業者、メーカーの計測データや処理・解析知見を知識データベース化することにより、国内の小規模地熱全体の効率・利用率の改善を目指す。

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では、過去事例の分析や A/B 発電所での実証試験により、地熱向け設備診断アセット、およびプラント性能監視システムを開発し、設備診断アセットの導入によるトラブル抑制効果を評価した。今後、他の発電所にも予兆診断システムを適用し、製品化を行う。

(2) 実用化・事業化に向けた具体的取り組み

優良事例形成の円滑化に資する環境保全対策技術に関する研究開発では、改訂版パタン参考集の知名度を上げるために、学会発表等により認知向上を図る必要がある。また、関係法令、技術革新、社会情勢が変化した場合、エコラン・マニュアルの更新が必要となり、その管理を継続する必要がある。そのために、エコラン・マニュアルの更新は、地熱関係の協会の協力を得られるように検討するとともに、学会発表等により、認知向上を図る。技術開発では、汎用性 3D アプリを製作するための無償版アプリのサポート切れに留意が必要で、他のアプリが活用できるか探しておく。

冷却塔排気に係る環境影響の調査・予測・評価の手法に関する研究開発では、ガイドライン(案)の認知度を高める必要がある。高性能センサの新規開発については、また、現時点では実用化に向けて技術的な課題はないものの、研究開発の継続が必要である。そのため、補助金等を活用して、実証研究を検討する。また、積極的に学術誌・イベント等の外部発表を実施して、認知向上を図る。

未利用地熱エネルギーの活用に向けた坑口装置の研究開発では、試作バルブを完成したが、当初目標としていた製作費に対して大幅にコストがかかる結果となった。今後の事業化へ向けて、更なるコスト削減を図るため、施工時間や加工時間の短縮、および盛金厚さの見直し等の課題に取り組んでいく。

未利用地熱エネルギーの活用に向けた技術開発では、開発したプラントリスク評価システムを利用すれば、地熱開発事業者にとって、酸性熱水資源の利用方針を決定する一助となることが期待される。今後、フロー式ポータブル材料試験装置を用いた現地腐食試験、腐食シミュレーション等のコンサルタント業務、およびケーシングを始めとした販売事業につなげていく事を目指す。

酸性熱水を利用した地熱発電システム実現に向けた耐酸性・低付着技術の研究開発では、実用化に向け、レーザを用いた樹脂/金属接合、および炭素膜による低付着表面改質等、実機形状への適用技術を確認した後、実証による性能評価を行う計画である。

酸性熱水利用のための化学処理システム開発では、実証試験可能な生産井を確保して実用化試験を行い、薬剤注入管の耐久性などを確認する。また、他の薬剤についても検討を進め、より経済性の良いシステムへの改良を行い、導入拡大に努める。

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では、NEDO での研究成果も取り込んだ上で、地下も含めた課題を総合的に取り扱うことが可能な AI 技術を活用した地熱発電設備 O&M の最適化技術として「地熱発電システムの持続可能性を維持するための IoT-AI 技術」の完成を目指す。

地熱資源適正利用のための AI - IoT 温泉モニタリングシステムの開発では、開発した AI - IoT システムのブラッシュアップを行うとともに、本システムのアウトプットをベースにした発電事業者と源泉所有者の合意形成法、温泉への影響判断のための枠組み、補償体制等を検討する。さらなる機能向上を図るとともに他分野への展開や海外マーケットの開拓を行う。

IoT-AI 適用による小規模地熱スマート発電&熱供給の研究開発では、開発成果に基づいて、多数の発電事業者、メーカーの計測データや処理・解析知見を知識データベース化することにより、国内の小規模地熱全体の効率・利用率の改善を目指す。

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では、過去事例の分析や A/B 発電所での実証試験により、地熱向け設備診断アセット、およびプラント性能監視システムを開発し、設備診断アセットの導入によるトラブル抑制効果を評価した。今後、他の発電所にも予兆診断システムを適用し、製品化を行う。

(3)波及効果

環境保全対策技術・エコロジカル・ランドスケープ手法（エコランツール）については、地熱開発以外にも風力発電風車建設や送電線鉄塔建設等、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。

環境保全対策技術・硫化水素測定器開発では、地熱アセスのみではなく、掘削・噴気試験、温泉地、火山地帯などでのモニタリングも可能であり、他分野での活用が望まれる。

小規模スマート発電システムにおける運転管理支援ツールでは、地熱発電のほか、バイオマスやコージェネなどのシステムや、その他再エネ用 EMS としての活用も可能である。

温泉資源適正化利用モニタリングシステムでは、温泉管理のみではなく、温泉発電を行う上でも利用可能な技術であり、資源の有効活用を図る上で普及が急がれる。併せて、温泉以外の水利用プラントにおいても管理システムとして適用可能であり、幅広い分野での活用が期待される。

腐食予測シミュレーションについては、他分野のプラント管理へ適用が可能であり、いろいろな事業の条件での検証・実証を行い、汎用的なシステムの構築が期待される。

酸性熱水対策・低コスト坑口装置開発については、超臨界地熱資源開発において適用される技術であり、国内外での普及が期待される。坑口装置だけでなく、配管（特にダメージを受けやすい曲がり部（エルボーやT字管など）にも適用される技術となる。

添付資料 1

個別テーマについて（全 10 テーマ）

個別テーマ (1.1)

(1) 発電所の環境保全対策技術開発

(1.1) 優良事例形成の円滑化に資する環境保全対策技術に関する研究開発

委託先：東北緑化環境保全株式会社

II. 研究開発マネジメントについて (事業の計画内容)

(1.1.1) 背景と目的

東日本大震災以降、再生可能エネルギーの導入は加速されており、地熱発電もその例外ではなく、天候に左右されず安定した発電が可能な地熱発電にも大きな期待が寄せられている。「長期エネルギー需給見通し(いわゆるエネルギーミックス)」においては、地熱発電の設備容量を2030年度までに、2016年度実績の約3倍(最大で約155万kW)にすることが目標(2019年8月時点)として掲げられ、今後10年で60万kWの設備容量に達するためには、数多くの地熱発電所を建設する必要がある。

日本の地熱賦存量は2,347万kWと推計され、全賦存量の80%弱が自然公園内に存在することから、環境省は、「国立・国定公園における地熱開発の取扱いについて(2015.10)」及び「同通知の解説(2016.6)」を公表して、国立・国定公園第2種及び第3種特別地域内においては、自然環境の保全と地熱開発の調和が十分に図られるなど、真に優良事例にふさわしいものであると判断される場合に、その実施を認めることができる、とした。

風致景観に関しては、全国景観会議からも要望書「自然エネルギー施設の設置に関する協力依頼(2018.11)」がNEDOに対して提示され、良好な景観形成に特段の配慮を求めているところである。

地熱発電の適地は、古くから温泉や観光により発展した地域が多く、地熱開発事業者(以下、「事業者」)は、温泉関係者や自然保護団体等の関係者と合意形成を図りながら、地熱開発を慎重に進める必要がある。環境省の条件付きで自然公園内での地熱開発が可能となり、固定価格買取制度(FIT)等の支援制度も充実してきたことから、新規の事業者が参入しやすい環境が整ってきたものの、一方で経験不足による自然環境への配慮や地域との関係構築に関して、懸念が生じている。

エコランツールは、優良事例の形成も視野に入れた先進技術であることから、地熱開発事業の円滑化が図られ、新規参入の事業者による前述の懸念も解消することが期待される。

しかし、事業者にとって、使用実績のない先進技術を採用することはリスクを伴うことから、客観的に有効性を評価した結果を示す必要がある。

以上のことから、本研究開発により地熱開発事業を円滑に進めるための知見が蓄積され、事業者の負担軽減、自然環境の保全、地域への還元が図られ、地熱発電の導入拡大の促進に貢献できるものと考えられた。

本研究は、国立・国定公園第2種及び第3種特別地域内における新たな地熱発電の導入拡大を促進するため、優良事例形成の円滑化に資する環境保全対策技術の有効性を評価することを目的とした。

(1.1.2) 研究開発の概要

本研究開発では、地熱開発に着手している事業地を対象に、地表調査、坑井調査、及び環境アセスメントの各段階において、先進的な環境保全対策技術（以下、「先進技術※」という）を試験運用し、以下の項目を実施し知見を得た。

- I. 既存事業地の自然環境情報、環境配慮事例の整理
- II. 先進技術の試験運用、環境配慮事例の検討
- III. 既存事業地の成果と試験運用結果の比較検証
- IV. 優良事例形成に係る先進技術の有効性評価

※先進技術

本研究において、試験運用する先進技術とは、NEDO事業として2014年度から2017年度にかけて研究開発された「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（略称、エコランセット）」を指す。エコランセットは、地表調査及び坑井調査段階において、事業者を支援するために開発され、優良事例の形成も視野に入れた環境保全対策技術として、先例のない技術である。

エコランセットは、地熱開発事業の検討手順、配慮事項、判断基準、3Dシミュレーション、優良事例に向けた効果的な施設配置パターン集など、大規模事業着手から計画決定までを網羅した技術集であり、「自然環境・風致景観配慮マニュアル（略称、エコランマニュアル）」、「支援アプリ」、「配慮手法パターン参考集（略称、パターン参考集）」から成る。

なお、エコロジカル・ランドスケープデザイン手法の概要については、環境省で開催された「第2回国立・国定公園内の地熱開発に係る優良事例形成の円滑化に関する検討会（平成27年4月23日）」でも取り上げられた。

各テーマにおける研究開発項目、開発目標及びその設定根拠を表Ⅱ-1に示す。

表Ⅱ-1 研究開発目標と根拠

開発項目	開発目標	設定根拠
I：既存事業地の自然環境情報、環境配慮事例の整理	<ul style="list-style-type: none"> 環境配慮手法の改良や新たな開発を促進するための環境配慮事例を配慮手法パターン参考集に掲載する。 	<ul style="list-style-type: none"> 公表可能な範囲で、3事業地における優良事例形成に向けて寄与した環境配慮の具体的内容を取りまとめる。 事業者は、優良事例形成に向け、その地域に即した対応を検討しているが、利害関係者が多いため、慎重な活動にならざるをえず、参考となる情報が得られにくい状況が続いている。環境配慮事例を情報共有・開示することは、環境配慮手法の改良、新たな開発を促進することとなり、結果的に自然環境、風致景観等への影響を低減させる技術の向上にもつながる。
II：先進技術の試験運用、環境配慮事例の検討	<ul style="list-style-type: none"> 地熱開発の各段階（地熱調査から環境アセスまで）に対応したケーススタディをエコラン・マニュアルに掲載する。 	<ul style="list-style-type: none"> 公表可能な範囲で、試験運用した事例について、分析作業の経緯を含め、取りまとめる。 エコランセットは、新規事業地だけでなく着手中の事業地でも活用できるため、事業者等が抵抗感なくエコランセットを採用できるよう、開発の各段階に対応した事例が必要である。
III：既存事業地の成果と試験運用結果の比較検証	<ul style="list-style-type: none"> 地熱開発関係者が共通認識をもつことや、エコランマニュアルの判断基準を適用する際の留意点に関する解説をエコラン・マニュアルに掲載する。 	<ul style="list-style-type: none"> エコランセットの概要、実践での活用時の留意点を取りまとめる。 事業者を支援するために開発されたエコランセットであるが、2018年7月リリース以来、使用実績がない。その原因の一つとして、事業者が地域住民や関係省庁に対し、エコランセットをわかりやすく説明した資料が不足していることが挙げられる。 エコランセットにより、地熱開発のすべての関係者が共通認識を持つことができる資料となれば、地熱開発の着手が円滑になると考えられる。 また、エコランセットはあらゆる事業地にも適用可能な表現でまとめてあり、基本的な内容に間違いはない。しかし、建設候補地は一つとして同じ条件はなく、各事業地に特有の自然環境や配慮事項があるため、エコラン・マニュアルの判断基準の適用上の留意点などの解説が必要である。
IV：優良事例形成に係る先進技術の有効性評価	<ul style="list-style-type: none"> 地熱開発事業の諸問題のうち、自然環境、風致景観、地域住民に関連する問題について、同時に解決する可能性のあるエコランセットを事業者等に普及させる。合わせて、本手法の費用対効果を示す。 	<ul style="list-style-type: none"> エコランセットの実践適用能力については、事業者だけでなく、環境省、経産省などあらゆる関係者が興味ある事項である。3Dアプリケーションだけでなく、エコロジカル・ランドスケープという概念（生態系、土木技術、景観を同時に実現）とともに、エコランセットの内容、実践での試験運用の状況を公的な場で発表することで、地熱開発が中断している事業地や、ノウハウが少ない新規参入の事業者への理解が深まり、地熱発電の導入拡大が促進されると期待される。

(1.1.3) 事業スケジュール

本研究開発の期間は2019年8月5日より2021年6月30日であり、そのスケジュールの概要を図Ⅱ-1に示す。

事業項目	2019				2020				2021			
	1 Q	2 Q	3 Q	4 Q	1 Q	2 Q	3 Q	4 Q	1 Q	2 Q	3 Q	4 Q
I. 既存事業地の自然環境情報, 環境配慮事例の整理			→									
II. エコランセットの試験運用, 環 境配慮事例の検討			→	→	→	→	→					
III. 既存事業地の成果と試験運用 結果の比較検証			→	→	→	→	→					
IV. 優良事例形成に係る先進技術 の有効性評価							→	→				
改訂版エコランセットの整備												
改訂版エコラン・マニュアル							→	→				
改訂版パタン参考集								→	→			
汎用性3Dアプリ							→	→				

図Ⅱ-1 研究開発のスケジュール

(1.1.4) 研究開発の実施体制

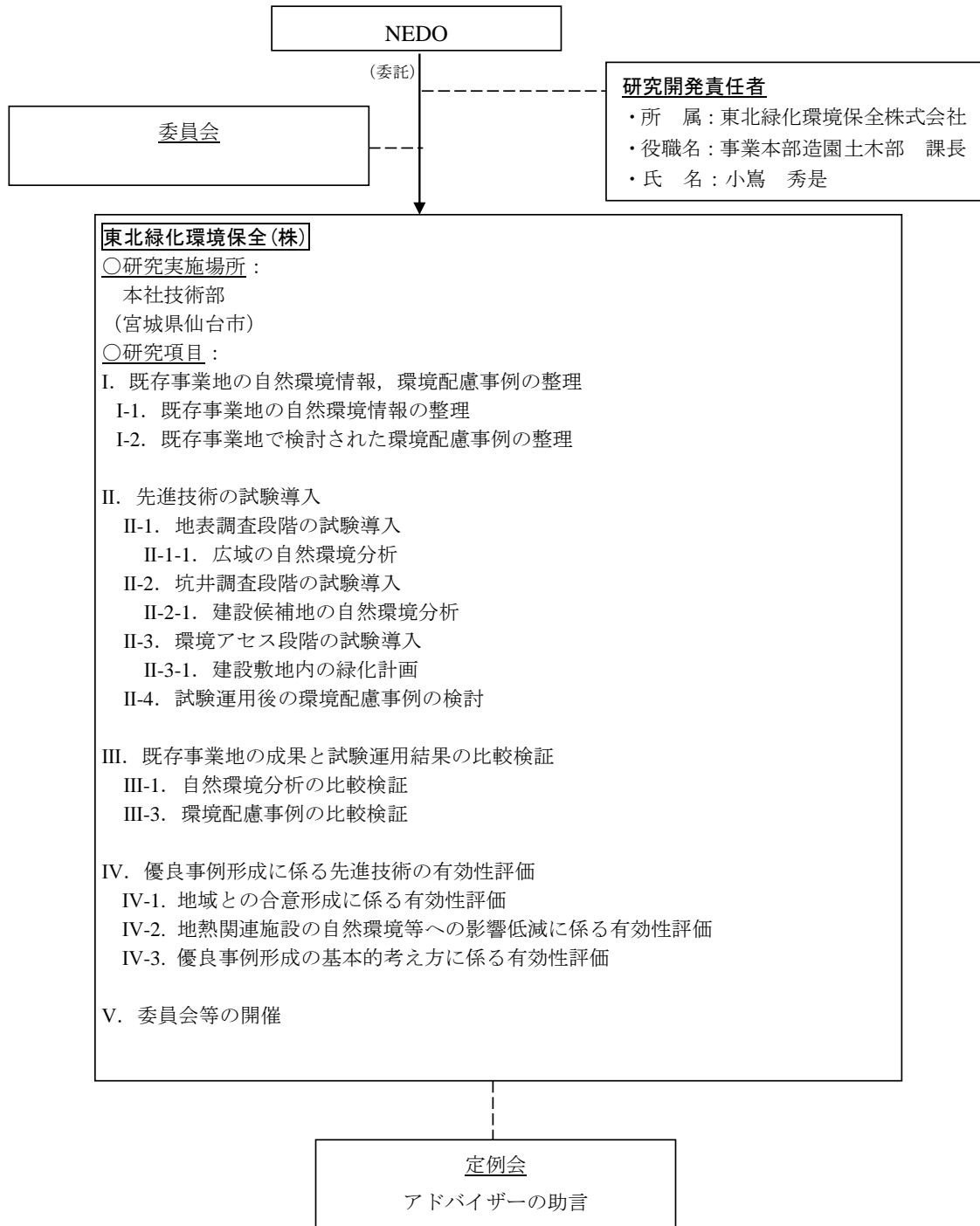


図 II-2 研究開発の実施体制

(1.1.5) 事業の管理運営

研究方法及び実験結果・考察等の客観性を確保するため、専門家等により構成される委員会を設置した。

表Ⅱ-2 委員会の概要

委員会の名称	検討対象とする研究項目
NEDO優良事例形成の円滑化に資する環境保全対策技術検討委員会	I～IVの項目全て

表Ⅱ-3 NEDO 優良事例形成の円滑化に資する環境保全対策 技術検討委員会

氏名	所属・役職	専門分野
阿部 聖哉	一般財団法人 電力中央研究所環境科学研究所 生物環境領域 上席研究員	植物生態学 景観生態学
斎藤 馨 (委員長)	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 (委員委嘱2019.9～2021.3) 学校法人 東京農業大学 造園科学科 教授 (同2021.5～2021.6)	景観学 造園学
野田 徹郎	国立研究開発法人 産業技術総合研究所 地熱調査総合センター 地圏資源環境研究部門 名誉リサーチャー	景観生態学

エコラン・マニュアル等に記載された意図、趣旨を適切に取り取り、エコランセットの試験運用の確度を高めるため、エコロジカル・ランドスケープ手法に造詣の深いアドバイザーを交えた定例会を設置し、毎月1回開催した。

表Ⅱ-4 NEDO 優良事例形成の円滑化に資する環境保全対策 技術検討定例会

氏名	所属・役職	専門分野
小川 総一郎	エコラン研究所 代表	エコロジカル・ランドスケープに関する著書多数 登録ランドスケープ・アーキテクト有資格者 公立大学法人 長岡造形大学 建築・環境デザイン学科教授
橋本 純	清水建設株式会社 環境経営推進室 グリーンインフラ推進部長	米国ランドスケープ・アーキテクト有資格者

Ⅲ. 研究開発成果について

本研究開発の成果は下表のとおりである。設定した目標に対して、全て最終目標を達成することができた。

表Ⅲ-1 最終目標に対する成果と達成度

開発項目	最終目標	成果	達成状況
I: 既存事業地の自然環境情報、環境配慮事例の整理	<ul style="list-style-type: none"> 環境配慮手法の改良や新たな開発を促進するための環境配慮事例を配慮手法パターン参考集に掲載する。 	<ul style="list-style-type: none"> 改訂版エコラン・マニュアルに、掘削機械に関する環境配慮事例を掲載した。 従来版パターン参考集(100パタンの環境配慮事例が掲載済み)に、新たに2パターン追加し、改訂版パターン参考集として整備した。 	達成
II: 先進技術の試験運用、環境配慮事例の検討	<ul style="list-style-type: none"> 地熱開発の各段階(地熱調査から環境アセスまで)に対応したケーススタディをエコラン・マニュアルに掲載する。 	<ul style="list-style-type: none"> 新たなGIS解析方法(マトリクス法)による地熱開発適地選定の手法を作り出し、改訂版エコラン・マニュアルに掲載した。委員の評価も得た。 試験運用で、事業者から評価された具体例を「ケーススタディ」として改訂版エコラン・マニュアルに掲載した。 	達成
III: 既存事業地の成果と試験運用結果の比較検証	<ul style="list-style-type: none"> 地熱開発関係者が共通認識をもつことや、エコラン・マニュアルの判断基準を適用する際の留意点に関する解説をエコラン・マニュアルに掲載する。 	<ul style="list-style-type: none"> 従来版エコラン・マニュアルの課題を洗い出し、あらゆる地熱関係者にもわかりやすい内容となることを目指し、主に以下の点について大幅刷新し、改訂版として整備。 地熱開発段階別の目次構成とし、活用場面を明確化 地熱関係者との認識共有のための用語解説を新設 自然公園法、地熱通知との関係箇所を明確化 地表・坑井調査段階の望ましい自然環境調査を例示 パターン参考集、3Dアプリとの連動性を向上 支援アプリの性能限界(3D再現範囲が狭い、バグが多い、汎用性がない等)が明らかとなった。無償版のゲーム制作用アプリケーション(Unreal Engine4)で、支援アプリの課題がほぼ解消でき、汎用性3Dアプリを開発。 	達成
IV: 優良事例形成に係る先進技術の有効性評価	<ul style="list-style-type: none"> 地熱開発事業の諸問題のうち、自然環境、風致景観、地域住民に関連する問題について、同時に解決する可能性のあるエコランセットを事業者等に普及させる。合わせて、本手法の費用対効果を示す。 	<ul style="list-style-type: none"> 合意形成、自然環境・風致景観への影響低減に寄与、地熱解説の基本的考え方に対応した改訂版エコランセットに仕上がった。 委員会、3事業者より好評を得た。 JOGMEC、環境省、経産省の担当部署へ、改訂版エコランセットを説明し、好感触を得た。 学会等の公式発表は未実施。 	達成

なお、エコランセットの呼称は、下表のとおりである。

参考 エコランセットの呼称

正式名称	2018年度NEDO公表	本研究における改訂版
エコランセット	従来版エコランセット	改訂版エコランセット
自然環境・風致景観配慮 マニュアル	従来版エコラン・マニュアル	改訂版エコラン・マニュアル
配慮手法パタン参考集	従来版パタン参考集	改訂版パタン参考集
3Dアプリケーション	支援アプリ	汎用性3Dアプリ

IV. 事業化へ向けての見通しと取組みについて

事業化に向けての見通しと今後の取組みは、下表のとおりである。

表IV-1 実用化の見通しと課題・取組み

開発項目	実用化の見通し	課題・取組み
I. 既存事業地の自然環境情報、環境配慮事例の整理	<ul style="list-style-type: none"> 環境配慮を検討する際、改訂版パターン参考集を活用することで、的確かつ迅速に対応できる。 許認可申請の参考資料としてそのまま活用できる。 	<p>(課題) 改訂版パターン参考集の知名度を上げる。</p> <p>(取組) 学会発表等により、認知向上を図る。</p>
II: 先進技術の試験運用、環境配慮事例の検討	<ul style="list-style-type: none"> 新たなGIS解析手法(マトリクス法)により、地熱開発適地の選定手順・判断基準が明確化し、客観性が高まるため、地熱関係者の理解を得やすくなった。 改訂版エコラン・マニュアルに「ケーススタディ」が掲載されたことで、事業者を受け入れられることが期待される。 	<p>(課題) 関係法令、技術革新、社会情勢が変化した場合、エコラン・マニュアルの更新が必要となり、その管理を継続する必要がある。</p> <p>(取組) エコラン・マニュアルの更新は、地熱関係の協会の協力を得られるよう、検討する</p>
III: 既存事業地の成果と試験運用結果の比較検証	<ul style="list-style-type: none"> 改訂版エコラン・マニュアルについて、事業の活用場面に合わせた目次構成、用語解説の新設、法令との関連箇所の明記、資源調査段階の自然環境調査の例示など、事業者やその他地熱関係者に理解しやすい内容となり、共通認識の醸成に寄与することが期待される。 実用性の高い汎用性3Dアプリにより地域住民とイメージを共有しやすくなった。 エコランセットの連動性が高まり、事業者の使いやすさが向上した。 	<p>(課題) 改訂版エコラン・マニュアルの知名度を上げる。</p> <p>(取組) 学会発表等により、認知向上を図る。</p> <p>(課題) 汎用性3Dアプリを製作するための無償版アプリのサポート切れに留意が必要。</p> <p>(取組) 他のアプリが活用できるか探しておく。</p>
IV: 優良事例形成に係る先進技術の有効性評価	<ul style="list-style-type: none"> 改訂版エコランセットを活用し、円滑に合意形成が得られることで、手戻り等による潜在的成本増や事業遅延を回避することが期待される。 改訂版エコランセットについて、JOGMEC、環境省、経産省の担当部署、研究に協力された3事業者から、好感触を得ており、今後、事業者を活用されることが十分に期待される。 	<p>(課題) 改訂版エコランセットの知名度を上げる。</p> <p>(取組) NEDOのホームページからエコランセットを公表する。</p> <p>(取組) 地熱関係の学会だけでなく、造園修景関係の協会の発表会等でも、認知向上を図る。</p>

個別テーマ (1.2)

(1) 発電所の環境保全対策技術開発

(1.2) 冷却塔排気に係る環境影響の調査・予測・評価の手法に関する研究開発

委託先：東北緑化環境保全株式会社、一般財団法人 電力中央研究所
学校法人東京農業大学 東京情報大学、株式会社ガステック

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

近年、再生可能エネルギーの導入は加速されており、地熱発電もその例外ではなく、天候に左右されず安定した発電が可能な地熱発電にも大きな期待が寄せられている。今後の地熱発電の普及に向けて事業者にとって大きな負担となる事項の一つに、環境アセスメントがある。現在、地熱発電所の環境アセスメントの実績は5件（手続き中を含む、2019年4月時点）しかないため、手続きを円滑に進めるための知見が乏しく、その蓄積が必要である。特に、地熱発電特有の項目については、調査、予測・評価の手法が確立されていない項目や最適化を図ることが望ましい項目があり、信頼性のある予測および評価手法の確立が喫緊の課題である。

課題となる主な具体的な内容は、以下のとおりである。

- 硫化水素による影響については、評価基準がなく、調査・予測にあたっての事業者負担が大きく、最適化を図るべき余地がある。
- 硫化水素の調査においては、現在の一般的な手法では、その場で測定値が分からない等の問題点がある。
- 硫化水素及び蒸気による植生又は樹木着氷影響についての知見がほとんどなく、発電所アセス手引きにも調査・予測・評価の手法が示されておらず、その手法の確立が必要である。

本研究開発は、地熱発電所に係る環境アセスメント手続きの円滑な推進を図るため、地熱発電事業に特有の影響要因であり、調査、予測および評価の手法が確立されていない項目や最適化を図ることが望ましい項目について、より適切な調査、予測・評価手法を確立するための知見を得ることを目的とした。

(1.2.2) 研究開発の概要

本研究開発で対象とする内容は、地熱発電所に係る環境アセスメントに特有の事項として、冷却塔から排出される硫化水素および蒸気に関するもので、大きく以下の3つテーマがある。

- I. 硫化水素拡散予測の最適化に関する検討
- II. 冷却塔から排出される硫化水素による植生への影響の評価手法に関する検討
- III. 冷却塔から排出される蒸気による樹木の着氷影響の予測・評価に関する検討

各テーマにおける研究開発項目、開発目標及びその設定根拠を表II-1に示す。

表II-1 研究開発目標と根拠

【I. 硫化水素拡散予測の最適化に関する検討】

開発項目	開発目標	設定根拠
1. 硫化水素拡散予測モデルの検証及び使い分け等の提案	<ul style="list-style-type: none"> • 冷却塔から排出される硫化水素による人への影響評価について、適切な予測モデルの使い分けや調査手法の簡略化などによる最適化を行い、事業者負担（時間・費用）を軽減できる調査・予測・評価の手法を提案する。 	<ul style="list-style-type: none"> • 硫化水素による影響評価は、NEDO研究開発事業により開発された「数値計算モデル（詳細予測モデル）」により、円滑化が図られたものの、改善すべき事項はまだ残されている。
2. 簡易な硫化水素測定器の開発	<ul style="list-style-type: none"> • 高性能センサの新規開発において、メチレンブルー吸光光度法と同等の下限值0.004ppm程度の性能を達成できる目途を得る • 既存の小型連続測定器の精度向上において、下限値0.01～0.04ppm程度の性能を有する試作機を作製する。 	<ul style="list-style-type: none"> • 硫化水素測定は、メチレンブルー吸光光度法で実施されているが、その場で測定値がわからないことや、準備や運搬・設置に手間がかかる等の問題点がある。
3. 高層気象観測の最適化を図るための検討	<ul style="list-style-type: none"> • 気象観測高度を「発電所アセス手引き」に記載されている500m未満程度に低下させても予測・評価に支障が生じない場合があることを明らかにする。 	<ul style="list-style-type: none"> • 高層気象観測は、多くの労力・費用が必要だが、予測には直接使用されていない状況であり、費用対効果等の面から簡略化を図る必要がある。
4. 硫化水素の測定手法に関する検討	<ul style="list-style-type: none"> • 開発を進める硫化水素測定器を用いて、より効率的且つ効果的な硫化水素測定のあり方を検討するとともに、その手法を普及・定着させる方法を検討する。 	<ul style="list-style-type: none"> • 開発を進める中で、硫化水素の小型連続測定器の試作機が完成し、実用化の道筋が見えてきた。

【Ⅱ. 冷却塔から排出される硫化水素による植生への影響の評価手法に関する検討】

開発項目	開発目標	設定根拠
1. 低濃度の硫化水素による植物影響評価に関する知見の蓄積	<ul style="list-style-type: none"> 冷却塔から排出される程度の濃度の硫化水素による植物影響の有無や程度を把握し、影響評価の際に参考となる知見を取りまとめる。 	<ul style="list-style-type: none"> 硫化水素による植生への影響に関する知見がほとんどない。
2. 硫化水素による植生影響のモニタリング手法の提案	<ul style="list-style-type: none"> 運転開始後にモニタリング調査を実施する場合において、より客観的な変化を効率的に把握する新たなモニタリング調査手法を提案する。 	<ul style="list-style-type: none"> モニタリング調査を実施することとなった場合に、UAVの活用等の新技術を導入することにより、より客観的及び効率的な調査が可能である。

【Ⅲ. 冷却塔から排出される蒸気による樹木の着氷影響の予測・評価手法に関する検討】

開発項目	開発目標	設定根拠
1. 冷却塔から排出される蒸気による樹木への着氷影響の予測・評価手法の検討	<ul style="list-style-type: none"> 冷却塔から排出される蒸気による樹木への着氷影響についての予測・評価の手法を提案する。 	<ul style="list-style-type: none"> 樹木への着氷影響に関する知見がほとんどない。

(1.2.3) 事業スケジュール

本研究開発の期間は2019年5月20日より2021年5月31日であり、そのスケジュールの概要を図Ⅱ-1に示す。

事業項目	2019				2020				2021			
	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q
I. 硫化水素拡散予測の最適化に関する検討												
1. 硫化水素拡散予測モデルの検証及び使い分け等の提案												
2. 簡易な硫化水素測定器の開発												
3. 高層気象観測の最適化を図るための検討												
4. 硫化水素の測定手法に関する検討												
II. 冷却塔から排出される硫化水素による植生への影響の評価手法に関する検討												
1. 低濃度の硫化水素による植物影響評価に関する知見の蓄積												
2. 硫化水素による植生影響のモニタリング手法の提案												
III. 冷却塔から排出される蒸気による樹木の着氷影響の予測・評価手法に関する検討												
1. 冷却塔から排出される蒸気による樹木への着氷影響の予測・評価手法の検討												

図Ⅱ-1 研究開発のスケジュール

(1.2.4) 研究開発の実施体制

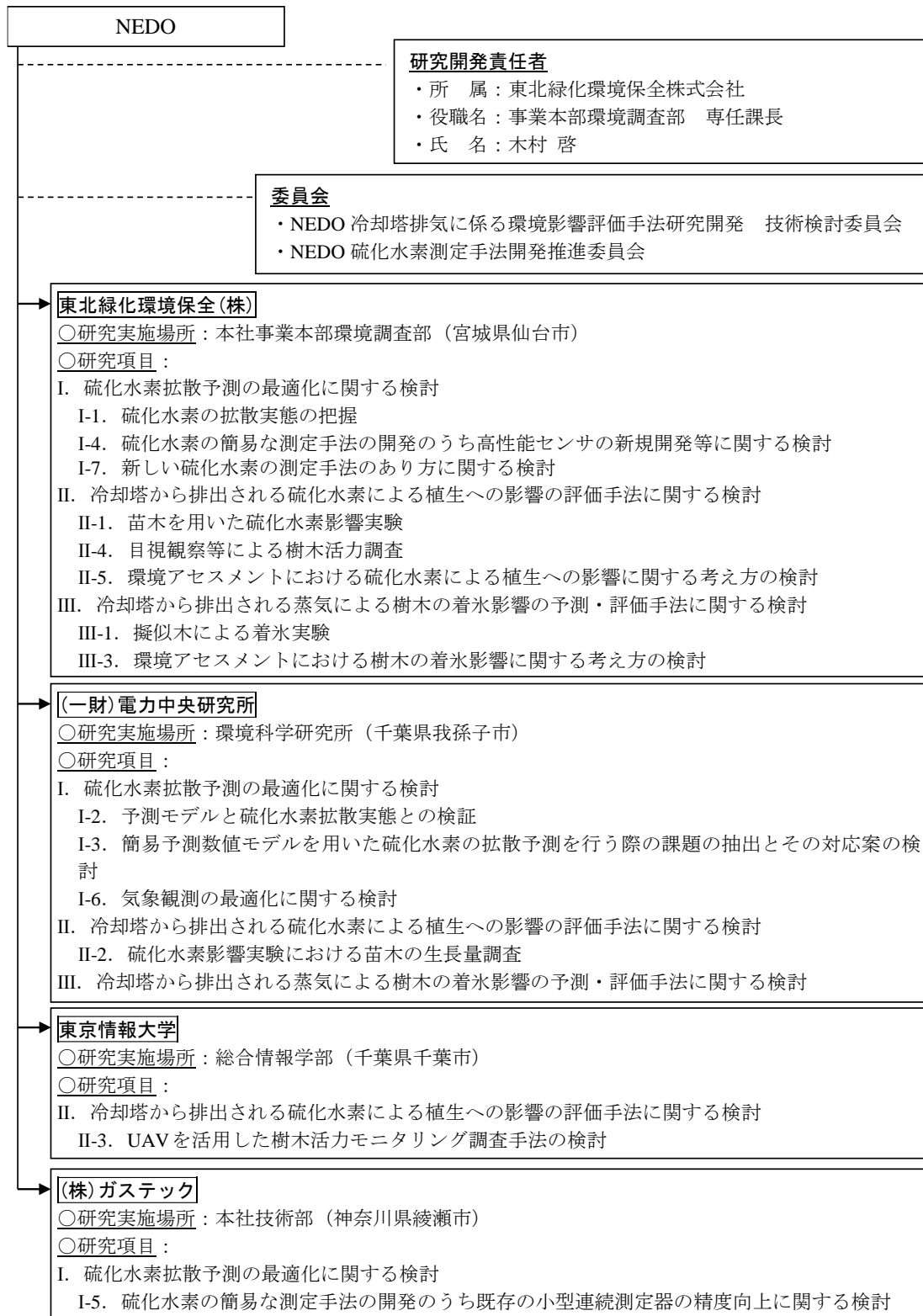


図 II-2 研究開発の実施体制

(1.2.5) 事業の管理運営

本研究開発を進めるにあたっては、2つの委員会を組織した。

表Ⅱ-2 委員会の概要

委員会の名称	検討対象とする研究項目
NEDO冷却塔排気に係る環境影響評価手法研究開発 技術検討委員会	下記以外の項目全て
NEDO硫化水素測定手法開発推進委員会	I-4. 硫化水素の簡易な測定手法の開発のうち高性能センサの新規開発等に関する検討 I-5. 硫化水素の簡易な測定手法の開発のうち既存の小型連続測定器の精度向上に関する検討 I-7. 新しい硫化水素の測定手法のあり方に関する検討

表Ⅱ-3 NEDO 冷却塔排気に係る環境影響評価手法研究開発 技術検討委員会

氏名	所属・役職	専門分野
市川 陽一	元 龍谷大学 先端理工学部 教授	(委員長) 大気環境
河野 吉久	(一財)電力中央研究所 名誉研究アドバイザー	植物
小野寺 亨 (前任：石崎 潤一)	東北電力株式会社 発電・販売カンパニー 火力部地熱統括センター 所長	地熱発電事業者

表Ⅱ-4 NEDO 硫化水素測定手法開発推進委員会

氏名	所属・役職	専門分野
浅沼 宏	(国研)産業技術総合研究所福島再生可能エネルギー研究部地熱チーム長(兼)東北大学客員教授	(委員長) 地熱開発専門家
戸田 敬	熊本大学大学院 先端科学研究部 教授	大気化学・火山ガス分析専門家
坂本 光弘	元 株式会社ジェイペック 環境部 審議役	地熱発電所環境影響評価の硫化水素調査実務者

Ⅲ. 研究開発成果について

本研究開発の成果は下表のとおりであり、設定した目標に対して、達成することができた。

表Ⅲ-1 最終目標に対する成果と達成度

【Ⅰ. 硫化水素拡散予測の最適化に関する検討】

開発項目	開発目標	成果	達成状況
1. 硫化水素拡散予測モデルの検証及び使い分け等の提案	<ul style="list-style-type: none"> 冷却塔から排出される硫化水素による人への影響評価について、適切な予測モデルの使い分けや調査手法の簡略化などによる最適化を行い、事業者負担（時間・費用）を軽減できる調査・予測・評価の手法を提案する。 	<ul style="list-style-type: none"> 野外における拡散実態の実測値と比較することにより、既に開発されている2つの予測モデルの精度を確認した後、適切な使い分けなどの考え方を「ガイドライン(案)」として取りまとめた。 	達成
2. 簡易な硫化水素測定器の開発	<ul style="list-style-type: none"> 高性能センサの新規開発において、メチレンブルー吸光度法と同等の下限値0.004ppm程度の性能を達成できる目途を得る 既存の小型連続測定器の精度向上において、下限値0.01～0.04ppm程度の性能を有する試作機を作製する。 	<ul style="list-style-type: none"> 高性能センサの新規開発では、より効率的に作業が可能な測定機器の開発の方向性を提示できた。 既存の小型連続測定器の精度向上では、試作機の性能評価等により明らかとなった課題を解決することで最小検出感度0.01ppmまで高められる見込みを得るとともに、実用化に向けた道筋を示せた。 	達成
3. 高層気象観測の最適化を図るための検討	<ul style="list-style-type: none"> 気象観測高度を「発電所アセス手引き」に記載されている500m未満程度に低下させても予測・評価に支障が生じない場合があることを明らかにする。 	<ul style="list-style-type: none"> 考慮すべき冷却塔排気の上昇高さは地上200～300m程度であることを確認できた。 	達成
4. 硫化水素の測定手法に関する検討	<ul style="list-style-type: none"> 開発を進める硫化水素測定器を用いて、より効率的且つ効果的な硫化水素測定のあるあり方を検討するとともに、その手法を普及・定着させる方法を検討する。 	<ul style="list-style-type: none"> 開発中の測定機器の実用化を見越し、測定手法の基本的な考え方を「あり方(素案)」として取りまとめた。 	達成

【Ⅱ. 冷却塔から排出される硫化水素による植生への影響の評価手法に関する検討】

開発項目	開発目標	成果	達成状況
1. 低濃度の硫化水素による植物影響評価に関する知見の蓄積	<ul style="list-style-type: none"> 冷却塔から排出される程度の濃度の硫化水素による植物影響の有無や程度を把握し、影響評価の際に参考となる知見を取りまとめる。 	<ul style="list-style-type: none"> 野外実験により、多くの地熱発電所周辺において記録されている硫化水素の濃度レベルでは、植生への影響は大きくないことを示唆する結果が得られた。 マルチスペクトルカメラ搭載UAVを用いた樹冠レベルの観測により、硫化水素による植生への影響について、植生指数を用いて把握できる可能性を示す結果を得ることができた。 	達成
2. 硫化水素による植生影響のモニタリング手法の提案	<ul style="list-style-type: none"> 運転開始後にモニタリング調査を実施する場合において、より客観的な変化を効率的に把握する新たなモニタリング調査手法を提案する。 	<ul style="list-style-type: none"> 新たなモニタリング調査手法として、UAVを用いた植生指数による調査方法の手順などを「ガイドライン（素案）」として取りまとめた。 	達成

【Ⅲ. 冷却塔から排出される蒸気による樹木の着氷影響の予測・評価手法に関する検討】

開発項目	開発目標	成果	達成状況
1. 冷却塔から排出される蒸気による樹木への着氷影響の予測・評価手法の検討	<ul style="list-style-type: none"> 冷却塔から排出される蒸気による樹木への着氷影響についての予測・評価の手法を提案する。 	<ul style="list-style-type: none"> 野外実験により着氷現象を確認し、その結果を基に、実務上十分な精度を有する着氷影響の予測手法を開発した。 着氷影響に対する環境配慮手順などを、「ガイドライン（案）」として取りまとめた。 	達成

IV. 事業化へ向けての見通しと取組みについて

事業化に向けての見通しと今後の取組みは、下表のとおりである。

表IV-1 最終目標に対する成果と達成度

【I. 硫化水素拡散予測の最適化に関する検討】

開発項目	実用化の見通し	課題・取組み
1. 硫化水素拡散予測モデルの検証及び使い分け等の提案	<ul style="list-style-type: none"> 硫化水素拡散予測モデルに関する「ガイドライン(案)」は、実用化可能な段階と考える。公表後、環境アセスメントを実施する案件での適用が期待される。 	<ul style="list-style-type: none"> ガイドライン(案)の認知度を高める必要がある。 学術誌・イベント等により、認知向上を図る。
2. 簡易な硫化水素測定器の開発	<ul style="list-style-type: none"> 高性能センサの新規開発については、実用化は可能だが、今後10年近くの研究継続が必要と考える。 既存の小型連続測定器の精度向上については、今後数年間の研究継続で実用化が可能と考える。 	<ul style="list-style-type: none"> 高性能センサの新規開発については、現時点では実用化に向けて技術的な課題はないものの、研究開発の継続が必要である。 既存の小型連続測定器の精度向上については、誤差要因の影響を低減するとともに、用途に応じた仕様の最適化により実用性を高める必要がある。 補助金等を活用して、実証研究を検討する。
3. 高層気象観測の最適化を図るための検討	<ul style="list-style-type: none"> 高層気象観測の最適化については、複数地点での現地検証を重ねることができれば、実用化が見込まれる。 	<ul style="list-style-type: none"> 現地検証を重ねる必要がある。 補助金等を活用して、実証研究を検討する。
4. 硫化水素の測定手法に関する検討	<ul style="list-style-type: none"> 簡易な硫化水素測定器の開発のうち、既存の小型連続測定器の精度向上について、実用化された後、実用化が見込まれる。 	<ul style="list-style-type: none"> 補助金等を活用して、実証研究を検討する。

【Ⅱ. 冷却塔から排出される硫化水素による植生への影響の評価手法に関する検討】

開発項目	実用化の見通し	課題・取り組み
1. 低濃度の硫化水素による植物影響評価に関する知見の蓄積	<ul style="list-style-type: none"> 硫化水素による植生への影響について得られた知見は、今後の環境アセスメントにおける予測において、参考になると考える。 	<ul style="list-style-type: none"> 学術誌・イベント等により、認知向上を図る。
2. 硫化水素による植生影響のモニタリング手法の提案	<ul style="list-style-type: none"> UAVを用いた植生指数による調査方法に関する「ガイドライン(素案)」については、現時点でも実務において参考となる手法だが、実用化には研究を重ねることが望ましいと考える。 	<ul style="list-style-type: none"> 研究開発の継続が必要である。 補助金等を活用して、実証研究を検討する。

【Ⅲ. 冷却塔から排出される蒸気による樹木の着氷影響の予測・評価手法に関する検討】

開発項目	実用化の見通し	課題・取り組み
1. 冷却塔から排出される蒸気による樹木への着氷影響の予測・評価手法の検討	<ul style="list-style-type: none"> 樹木への着氷影響に関する「ガイドライン(案)」は、実用化可能な段階と考える。公表後、環境アセスメントを実施する案件での適用が期待される。 	<ul style="list-style-type: none"> ガイドライン(案)の認知度を高める必要がある。 学術誌・イベント等により、認知向上を図る。

個別テーマ (2.1)

(2) 地熱エネルギーの高度利用化に係る技術開発

(2.1) 未利用地熱エネルギーの活用に向けた坑口装置の研究開発

委託先：株式会社ティクス IKS

II. 研究開発マネジメントについて (事業の計画内容)

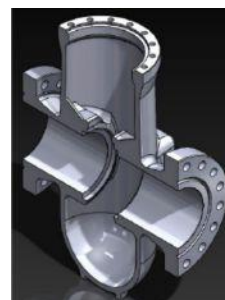
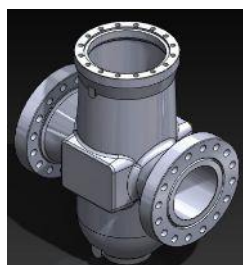
(2.1.1) 事業期間における研究開発の目標

(1) 動機・背景

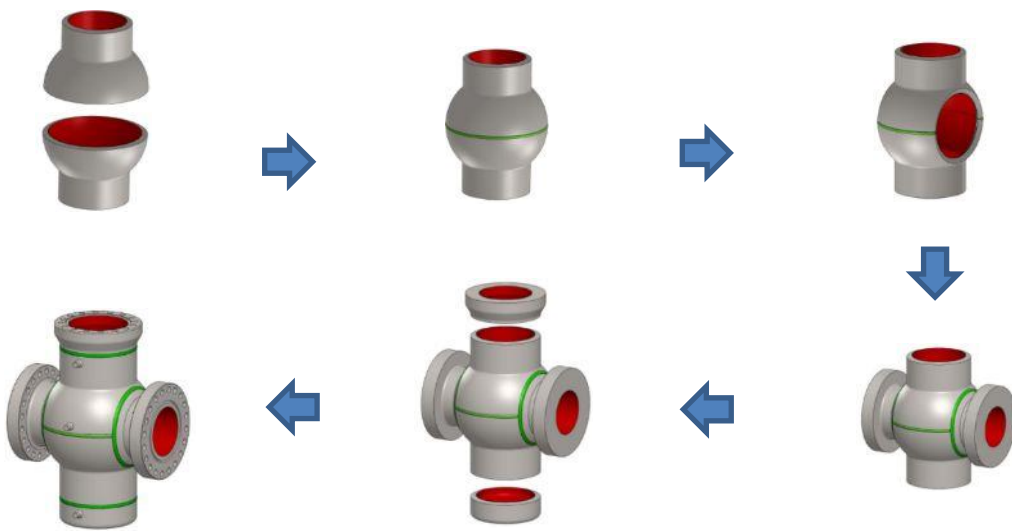
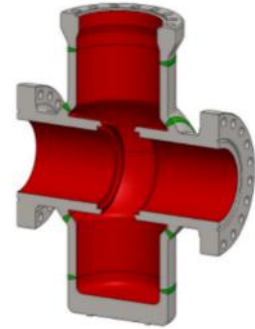
2014年4月に「エネルギー基本計画」が閣議決定され、地熱発電の2030年度における導入見込量を約3倍に拡大するという目標が掲げられた。地熱発電は新エネルギー開発の要として期待されている。本研究により、強酸性によって現在未利用となっている地熱エネルギーの利用を可能にし、地熱発電の活用促進に貢献していく。

従来、強酸性の地熱坑井は、高い耐食性を確保するために高価な鋼材を使用する必要があるため、コストの面で不利となり開発対象から除外される傾向にあった。坑井機材であるマスターゲートバルブにおいて、口径150A以上のバルブのボディは、基本的に鋳造で製作されるが、高耐食性を得るためにはオーステナイト系ステンレス等でボディ全体を製作せざるを得ず、コスト増の原因となっていた。また鋳造ボディの場合、流体の通る内面のみを溶接盛金することは可能であったが、ボディの内面全てに盛金を行うことは、形状の複雑さから実施できなかった。当社の開発した鍛造ゲートバルブでは、基本的に円筒及び球形状の各部品を溶接して製作するため、内面の盛金を容易に実施できる。そのため、ボディの母材を通常鋼材で製作し、流体の触れる内面全面に盛金をすることにより、高耐食性の素材で鋳造するよりも低コストで高耐食性な製品を製作することが可能となる。

鋳鋼製：一体型で内部形状が複雑なため内面を盛金出来ない。



鍛造製：分割して溶接できるため内全面が盛金可能。
※製品化を実現する盛金を確立するには、相当の評価項目及び評価期間を要する。



(2.1.2) 目標

開発項目	開発目標	設定理由
1. レーザー溶接機の導入及び溶接盛金条件の確立	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 通常盛金及び内面盛金の評価を可能にする。 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ レーザー溶接機による盛金の例は国内外で少なく、特に内面盛金用のヘッダーは適用例がない。盛金評価、バルブの製作が可能になるまでの条件出しを完了する。ビーム幅の広い内面盛金用ヘッダーを導入し、将来の低コスト化、量産化を見据えた盛金施工法を完成させる。
2. 盛金の評価	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 通常盛金ヘッダーで盛金したテストピースで、盛金評価を実施し、次の項目において基準を合格する（引張試験、曲げ試験、硬度測定、外観観察、化学成分分析）。 ➤ 内径用ヘッダー（大・小）についても上記と同様に盛金評価を実施する。 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 合格基準を満足すれば、従来の製品バルブの耐食基準（腐食速度：0.08mm/year 30年使用で盛金部 2.4mm の腐食）を十分に上回るため。 ➤ レーザー溶接機による耐食金属の盛金の品質が実際のバルブに適用するのに十分であることを確認するため。
3. 実地試験用バルブの製作	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 試作バルブ設計・製作。 ➤ ロボット条件出し。 ➤ 溶接接合部の施工法確立。次の項目において基準を合格する（引張試験、曲げ試験、硬度測定、外観観察）。 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 溶接接合部が実際のバルブに適用するのに十分であることを確認するため。 ➤ 研究開発項目4で選定した実地試験地において、pH3程度の強酸性環境による実地試験を行うため及び、ゲートバルブの採算性を確認するため。
4. 実地試験場所調査・選定	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 実地試験場所を1件選定する。 	本研究開発で製作したバルブ（研究開発項目3）を実際の酸性環境井戸で評価するため。

(2.1.3) 事業スケジュール

	2018年度	2019年度				2020年度				2021年度
	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q
1. レーザー溶接機導入										
・レーザー発信機	→									
・通常ヘッダー導入	→									
・内径用(小)ヘッダー導入				→						
・内径用(大)ヘッダー導入								→		
2. 盛金の評価										
・通常ヘッダーの施工法確立		→								
・内径用(小)ヘッダーの施工法確立				→						
・内径用(大)ヘッダーの施工法確立									→	
3. 試験用バルブの製作										
・溶接接合部の施工法確立								→		
・ロボット条件出し、設計		→								
・バルブ製作									→	
4. 実地試験場所調査・選定		→								

III. 研究開発成果について

本事業では強酸性に耐えることができ、かつ低コストでバルブの製作を実現するために、バルブボディー本体は常用鋼材を用い、内面に耐食金属を盛金する手法を開発する。また、内面に盛金する手法として、溶接盛金によるボディーの歪みを最小限に抑えられ、かつ低コストなレーザー盛金の施工法を確立する。

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. レーザー溶接機の導入及び溶接盛金条件の確立	<ul style="list-style-type: none"> 通常盛金及び内面盛金の評価を可能にする。 	<ul style="list-style-type: none"> 通常盛金用ヘッダー導入完了。 内面盛金用ヘッダー大小の導入を完了。 	○ (完了) 装置の導入完了
2. 盛金の評価	<ul style="list-style-type: none"> 通常盛金ヘッダーで盛金したテストピースで、盛金評価を実施し、次の項目において基準を合格する(引張試験、曲げ試験、硬度測定、外観観察、化学成分分析)。 内径用ヘッダー(大・小)についても上記と同様に盛金評価を実施する。 	<ul style="list-style-type: none"> バルブ適用に最適と思われる盛金条件を見だし、評価。テストピースに盛金を行い、硬度試験・曲げ試験・マクロ観察・化学成分分析を外部機関で実施した。通常盛金用ヘッダー及び内面盛金用ヘッダー(大・小)ともに、目標値を満たす結果となった。 	○ (完了) 外部機関の施工法試験完了
3. 実地試験用バルブの製作	<ul style="list-style-type: none"> 試作バルブ設計・製作。 ロボット条件出し。 溶接接合部の施工法確立。次の項目におい 	<ul style="list-style-type: none"> 内面を耐食盛金した鍛造部品の溶接が十分な品質であることを確認するため、製品と同じ構造を持つテストピー 	○ (完了) 外部機関の施工法試験完了 試作バルブ1台完成

	<p>て基準を合格する(引張試験、曲げ試験、硬度測定、外観観察)。</p>	<p>スを製作、溶接接合部の評価を実施し、目標値を満たす結果となった。</p> <p>➤ 内部を盛金した鍛造部品を溶接接合して試作バルブを完成させた。</p>	
<p>4. 実地試験場所調査・選定</p>	<p>➤ 実地試験場所を1件選定する。</p>	<p>➤ 本開発で製作したバルブ(開発項目3)を実際の酸性環境井戸で評価するために、関連企業と検討し、実証実験に適した実地試験場所を1件選定した。</p>	<p>○(完了)バルブの設置にリグが必要。莫大なコストが掛かるため、掘削中の現場において、他の評価と同時に進めるべき</p>

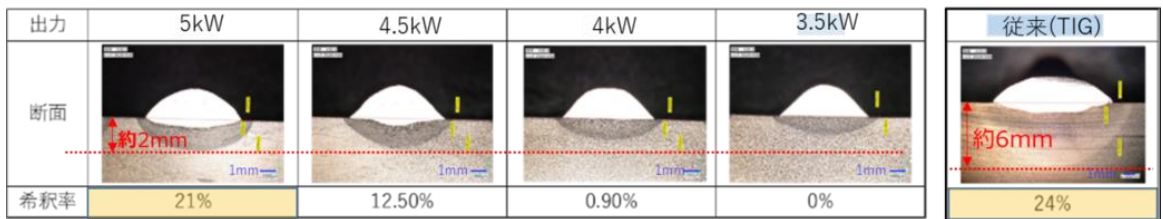
開発項目 1 「レーザー溶接機の導入及び溶接盛金条件の確立」

従来 TIG、MAG または MIG 溶接で行っていた盛金溶接をより歪みが少なく精度の高い盛金が施工出来るよう、レーザー盛金の機材を選定し溶接条件を確立するため以下を実施した。

① 通常盛金用ヘッダーの導入

テストピースにおける評価を実施。従来の TIG 溶接との比較を行った。結果として、レーザー溶接は熱影響が従来の TIG 溶接に比べ約 1/3 程度であることが確認され、盛金溶接による変形が少なくなることを確認した。また同程度の高さで盛金した場合も希釈率を少なく盛ることが可能になるため、盛金部の成分値が安定することも確認した。

TIG 溶接とレーザー溶接の比較 (参考：通常ヘッダー)



② 内面盛金用ヘッダーの導入

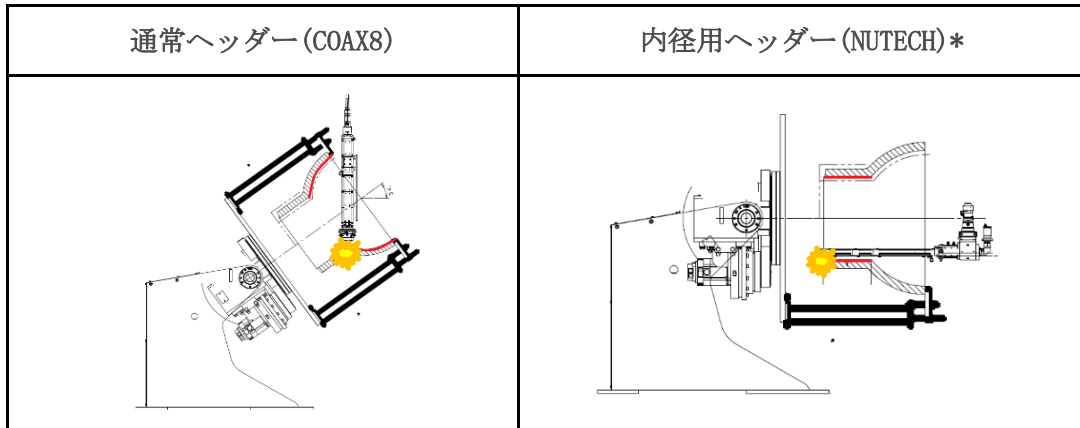
テストピースにおける評価を実施。①通常盛金用ヘッダーの評価と同様に盛金溶接による変形が少なく (熱影響が少ない)、盛金成分値が安定していることを確認した。

③ 内面用盛金用大口径ヘッダーの導入

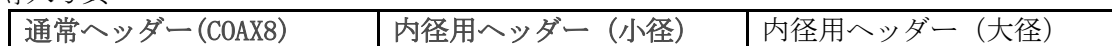
更なるコスト削減を追求するため、内面盛金用大口径ヘッダーを新規導入し、テストピースによる評価を実施して①通常盛金用ヘッダー同様の結果を確認した。

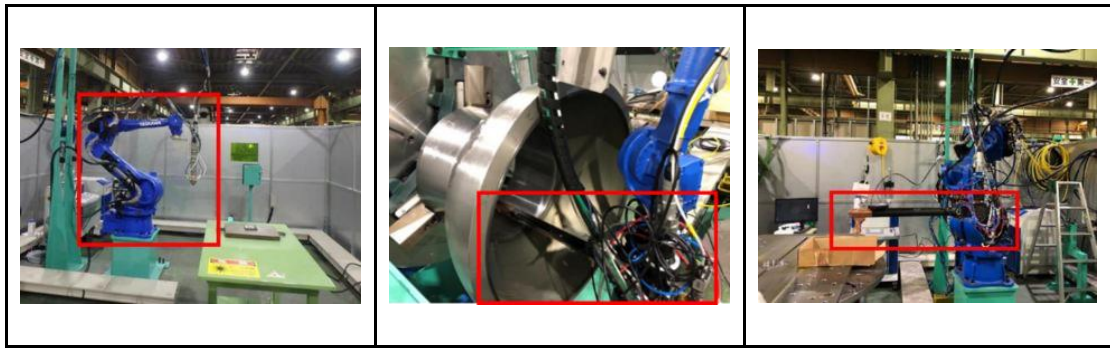
レーザーヘッダーの種類

*世界的にも導入実績が少ない



導入写真





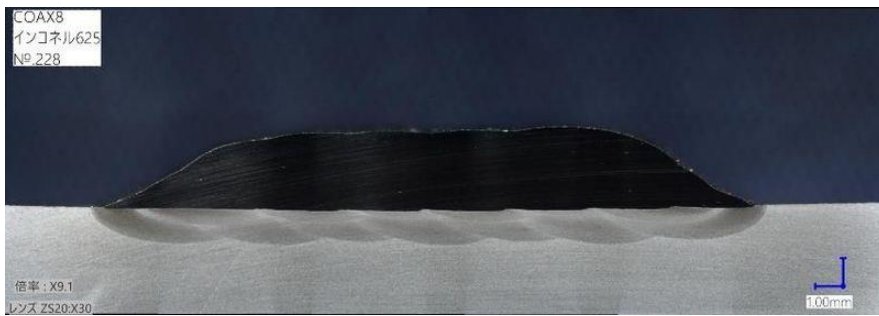
研究開発項目 2 「盛金の評価」

通常盛金用ヘッダー及び内面盛金用ヘッダーによる盛金の品質が実際のバルブに適用するのに十分であることを確認するため以下を実施した。(耐食盛金インコネル 625 の評価)

- ① 盛金条件 (盛金高さ 2.4mm・希釈率 10%以下) を満たすために、通常盛金用ヘッダー及び内面盛金用ヘッダーにおいて、盛金に影響するパラメータであるレーザー出力 (kW) ・速度 (cm/min) ・パウダー供給量 (g/min) ・キャリアガス供給量 (L/min) ・シールドガス供給量 (L/min) ・シフト量 (mm) の違いによる影響を確認するため、テストピースに盛金し評価を行った。

【通常ヘッダーの盛金条件 (参考)】

ヘッダー	レーザー出力	速度	パウダー	シールドガス	シフト量	積層数	盛金高さ	希釈
	(kW)	(cm/min)	(g/min)	(L/min)	(mm)		(mm)	(%)
通常 (COAX8)	2.7	90	23	18	3	3	2.58	6.9



- ② ①の評価結果を踏まえ、一番適正であると判断した条件で盛金したテストピースを作製し、硬度試験・曲げ試験・マクロ観察・化学成分分析を外部機関で実施した。
通常盛金用ヘッダー及び内面盛金用ヘッダー(大小)ともに、硬度試験・曲げ試験・マクロ観察・化学成分分析のいずれも目標値を満たす結果となった。

【肉盛評価内容・結果】

評価項目	評価基準 (インコネル 625)	結果
硬度測定	盛金部: HRC35 以下、母材部: HRC22 以下 (HV345 以下) (HV248 以下)	○ 基準値内で合格
曲げ試験	3mm を超える熱影響部の開口した不連続がないこと 溶接金属部の開口が 1.5mm 以下であること ボンド部に 3mm を超える開口がないこと	○ 外観不良等なく合格

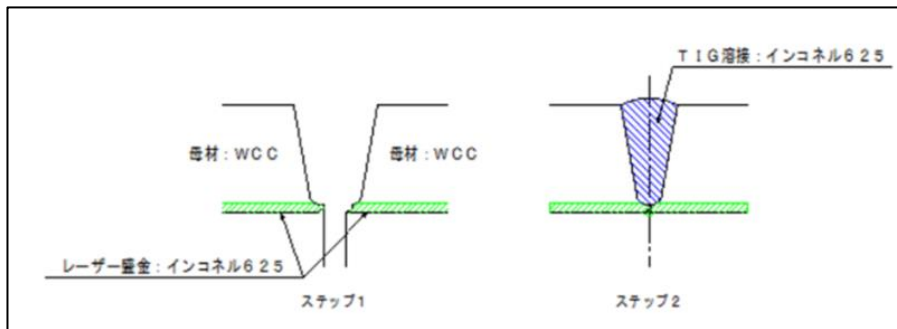
マクロ観察	断面の溶着金属及び熱影響部を目視し、融合が完全であり、割れないこと	○ 欠陥不良なく合格
化学成分分析	インコネル 625 : Fe ≤ 5.0%	○ 基準値内で合格

研究開発項目 3 「実地試験用バルブの製作」

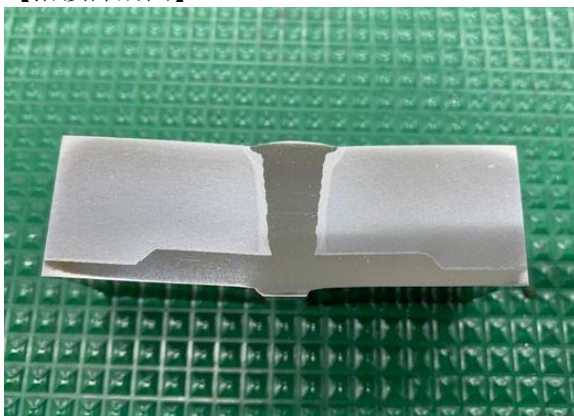
内部を耐食性金属で盛金した鍛造部品を溶接するのに十分な品質であることを確認するため、以下を実施し試作バルブを製作した。

- ① 通常盛金用ヘッダー及び内面盛金用ヘッダーによる盛金について、位置指定や動作プログラム作成も含めたロボットの条件出しを行い、試作バルブの製作を可能とした。
- ② 内面を耐食盛金した鍛造部品の溶接が十分な品質であることを確認するため、製品と同じ構造を持つテストピースを製作し溶接接合部の評価を実施した。引張試験・曲げ試験・硬度測定・マクロ観察のいずれの項目においても、目標値を満たす結果となった。

【溶接方法】 溶接図



【溶接部断面】





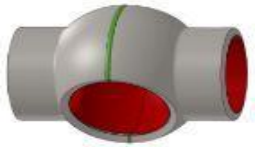





【溶接部評価内容・結果】

評価項目	評価基準 (インコネル 625)	結果
硬度測定	盛金部：HRC35 以下、母材部：HRC22 以下 (HV345 以下) (HV248 以下)	○ 基準値内で合格
引張試験	母材の最小規定引張強さ (485MPa) を下回らないこと	○ 基準値以上で合格
曲げ試験	試験片の側面ではいかなる方向に測定しても、3mm を超える溶接部、熱影響部の開口した不連続がないこと	○ 溶接部、熱影響部へ割れ等なく合格
マクロ観察	・全て完全溶け込み溶接であること ・内外面のアンダーカットが当該部分の最小肉厚を割り込んでいないこと	○ 外観に異状なく合格

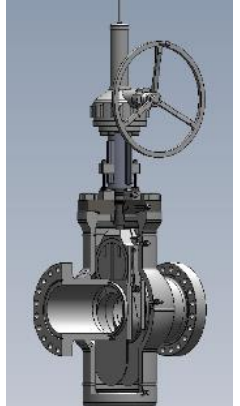

	・ピンホールと露出したスラグがないこと	
--	---------------------	--

- ③ 内部を盛金した鍛造部品を溶接接合して試作バルブを完成させた。ただし、製作費に関しては目標価格 1,500 万円を超える結果となった。

【試作バルブ製作写真】 緑部：溶接線 赤部：肉盛溶接

<p>試作バルブボディ製作予定図</p> 	<p>試作バルブボディ製作</p> 
	
	
	

【試作バルブ完成写真】

<p>試作バルブ完成予定図</p> 	<p>試作バルブ完成</p> 
---	--

研究開発項目 4 「実地試験場所調査・選定」

関連企業等の外部機関の協力を得ながら実地試験が可能な地熱井戸の調査・選定及び実地試験方法を検討する。

上記目標に対し、GERD 社や取引先の地熱発電開発業者にヒアリングを実施。耐酸性バルブを評価するには地熱井に使用するリグが必要となるため、バルブ単体での評価はコストに見合わない。リグ使用の負担を軽減するため、稼働中の掘削現場で設置対象井戸を指定し、使用中リグを転用することや、耐酸性地熱用パイプなどの他の評価と合わせて実施するのが最善と思われる。引き続き関係者と連絡を取りながら、該当井戸の選定を行っていく。なお、海外での評価は、GERD 社の経験から、現地の掘削業者や責任者との契約や手続きに大幅な工数と予算が割かれる可能性が高く、現実的ではない。

IV. 事業化へ向けての見通しと取組みについて

今回の研究開発で試作バルブを完成させることが出来たが、当初目標としていた製作費に対して大幅にコストがかかる結果となった。今後の事業化へ向けて、更なるコスト削減を図るため、以下の課題に取り組んでいく。

① 課題：製作費用の削減

- ・ 内径盛金ヘッダーの歩留り改善（現状 30～40%）
- ・ 盛金厚さ見直し（現状 2.4mm）
- ・ 溶接接合部の施工時間短縮
- ・ 加工修正時間の短縮

② 取組み

- ・ 内径盛金ヘッダーの歩留りを改善するために、メーカーの協力を得てレーザースポット径と角度の改造を行う。
- ・ 試作バルブの減肉量を実地試験前試験後に肉厚を測定・比較し、肉盛厚さを見直して工数削減をはかる。
- ・ サブマージや MIG 溶接でも熱影響を低減させる施工法を検討し、TIG 溶接より短時間で施工できる条件を確立する。
- ・ 試作段階における製造工程を見直して加工や肉盛を効率よく行える工程を確立する。

個別テーマ (2.2)

(2) 地熱エネルギーの高度利用化に係る技術開発

(2.2) 未利用地熱エネルギーの活用に向けた技術開発（在来型地熱資源における未利用酸性熱水活用技術の開発）

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，国立大学法人京都大学

II. 研究開発マネジメントについて（事業の計画内容）

(2.2.1) 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。特に、酸性熱水や過熱蒸気井にて低 pH の凝縮水が発生するケースでは、主に炭素鋼が使用されている坑井ケーシング、地表配管、発電設備において、全面腐食およびエロージョンを主体とした損傷による影響が大きい。炭素鋼や低合金鋼では、pH4 以下の高温環境では腐食が進行する。オーステナイト系ステンレス鋼および二相ステンレス鋼では、塩化物と硫化水素が共存する場合応力腐食割れ（SCC）が発生する可能性が高くなることが知られ、また、硫化水素が共存する場合には、マルテンサイト系ステンレス鋼では孔食・すきま腐食、あるいは硫化物応力腐食割れ（SSCC）が生じる可能性がある。

このように、酸性熱水を利用する場合、熱水性状や含まれる非凝縮性ガスの成分、温度、pH 等により適切な金属材料を選択していく必要性に迫られることになる。1992 年度に実施された「酸性熱水の対策技術等に関する調査研究」（NEDO, 1992）に拠ると、地熱開発会社へのアンケートにおける pH5 以下の酸性熱水噴出坑井数の割合は 13.3%であったが、いくつかの地域での噴出熱水の平面的な pH 分布から見積もられた酸性熱水の出現頻度（割合）は 30%程度であった。この調査報告書でも、掘削地熱坑井は本来生産を目的とした生産井であるため、わざわざ酸性熱水の出現頻度の高い場所を含めて均等に掘削することはありえないと指摘している。調査報告書では、高温熱水対流型資源（ $>150^{\circ}\text{C}$ ）の資源ポテンシャルを 20,540MW としてその 30%（6,160MW）が酸性熱水資源であると評価した。これを最近の評価値である 23,470MW（村岡，2014）で置き換えると 7,041MW が未利用の酸性熱水資源であると考えられる。また、2030 年の新規発電所建設目標である 980MW の 30%とすると 294MW に相当する。また、NEDO(1992)での酸性熱水噴出坑井数のアンケート結果である 13.3%を基数として考えれば 130MW に相当

し（図1）、酸性熱水資源活用に向けた対策技術開発は今後の地熱資源利用促進に向けた重要な技術になると考えられる。

2014年度～2017年度にNEDO委託事業にて実施した、「地熱発電技術研究開発／地熱発電の導入拡大に資する革新的技術開発／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）」では、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て、以下の開発成果を得た。

要素技術として、サンシャイン計画の材料データベースを基に、2002年以降の最新データに基づき、データベースの更新を行い、実証試験データとの比較もを行い、腐食速度の推定法（Cr当量・実験データの回帰式の2方式）において腐食速度推定の信頼性を向上した。また、腐食やスケールのリスクを実地試験にて評価検証する手段として、腐食リスクにかかわる可搬型フロールーブ腐食試験装置を開発した。可搬型フロールーブ腐食試験装置では、単相流（分離熱水）配管と二相流配管において、短期（1週間）ならびに長期（1か月）の実証試験を実施し、腐食試験装置の実用化の目途を立てた。また、データ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た。

腐食・スケール発生リスクは地熱発電所運開までの開発や操業フェーズにおいて、利用率の向上を図るためにも可能な限り低減していくことが望ましいものである。本研究開発の成果は、地熱開発を目指す事業者にとっては、データベース等の過去の知見や予測技術を利用することが可能になることで、事前に開発リスクを予見し、対策を講じ易くすることが期待されるとともに、既存の発電所においても、利用率の向上に資する技術であると期待される。

本研究開発の成果を受けた今後の研究課題としては、サンシャイン計画におけるデータベースでは取り扱っていない温度領域（300℃～370℃）におけるオートクレーブ材料試験の実施によるデータベースの整備、二相流条件での安定した腐食試験方法の確立、腐食試験における金属表面でのスケール形成による腐食抑制効果メカニズムの解明、重金属スケール（アンチモン、ヒ素など）の金属表面での形成とその効果の解明、対策技術のための新たな選択枝の導入（例えば、新しい金属材料や新しい腐食抑制剤などの技術情報の追加など）、より強酸性の地熱環境下での実証試験による検証、等が挙げられる。

そこで、本事業では比較的データの少ない高温・低pH環境における金属材料耐腐食性能データ、ならびに酸性対策技術を基に、酸性熱水に対応した地熱発電プラントリスク評価システムを開発し、地熱開発事業者が酸性熱水を地熱資源として活用する上で、

必要となる情報を提供できるシステムを開発することを目的とした。

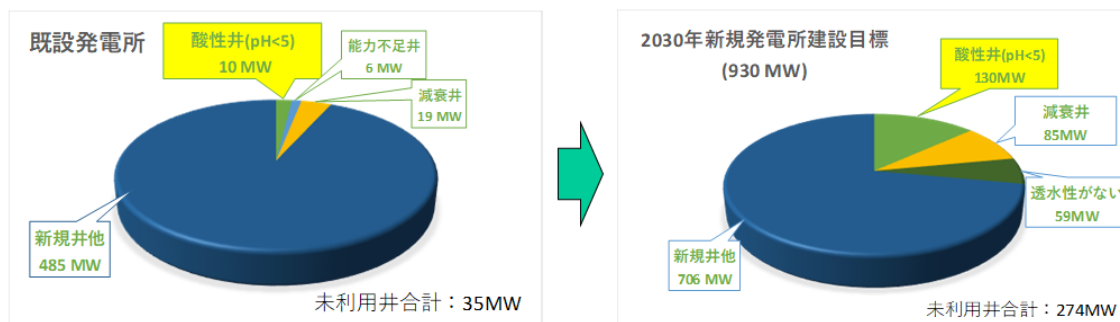


図 II-1 NEDO, 1992 での酸性熱水噴出坑井数のアンケート結果である 13.3%を基にした ポテンシャル

(2.2.2) 研究開発の概要

本事業では、地熱開発事業者が酸性熱水対策を検討する際に利用可能な、“酸性熱水に対応した地熱発電プラントリスク評価システム”を開発し、Webでの公開を行うことを目標とし、これを全体システム開発と位置付けた。全体システム開発を進める上で、酸性熱水の利活用を進めていくための要素技術として、“最適材料選定に係る技術開発”、“薬注法・シミュレーションによる腐食対策技術開発”を進めた。

表Ⅱ-1 研究開発目標と根拠

開発項目	目標	設定根拠
I.酸性熱水に対応した地熱発電プラントリスク評価システム開発	・高温（300-370℃）、pH<3.0に対応したプラントリスク評価システムを開発し、システムをWEB上で公開する。	本開発項目は、II,IIIの要素技術で開発される腐食対策技術や情報を、酸性熱水問題を抱える地熱デベロッパーが活用しやすい形で提示し、酸性熱水資源の活用に至る一助となることを目指すものである。本目標に対し、アクセスし易い形での公開、流体性状による材料選定に係る情報、必要なキーワードによる論文等の情報検索が可能なシステムを構築することを目指す。
II.最適材料選定に係る技術開発	・高温（300-370℃）、pH<3.0環境での腐食材料試験、腐食予測式を組み込んだ材料選定チャートを開発する。	酸性熱水を生産するケースでは、地表設備を含めたトラブル回避のため、廃棄や転用がなされ酸性熱水の利用自体が限られている実態がある。酸性熱水に対する腐食対策としては、まず、ケーシングの腐食に対する対策を講じていくことが優先される課題といえるが、耐腐食性能の高い金属はコストが高く、費用対効果から使用は慎重にならざるを得ない。そこで、各種既存金属材料の耐腐食性能評価結果を本技術開発により精度を向上させることにより、いたずらに高価な材料を用いるのではなく、耐用年数の見積もりとコストから適切な材料を選定できる判断材料を整備することが将来の酸性熱水資源の活用に必要な不可欠なため。
III.薬注法・シミュレーションによる腐食対策技術開発	・高温（300-370℃）、pH<3.0に対応したインヒビター等の腐食防止効果のある薬注技術に係る最新技術を調査・検証し、対策手法に反映する。 ・腐食シミュレーションにより腐食防止効果を高める条件等の予測技術を開発する。	酸性熱水対策へのアプローチとしては、II.の調査に基づく酸性環境に耐えうる金属の選定・使用に加え、薬注等により熱水自体を腐食しにくい環境へ変えるアプローチがある。本手法は、すでに設置されているケーシング・配管等に対する対策技術として活用できる点が重要である。 また、シミュレーション手法により、腐食が進みやすい箇所 の推定や、スケールを付着させることによる腐食防止の可能性等を予察できる技術を開発することで、腐食環境の適切な把握・管理を可能にする。

(2.2.3) 事業スケジュール

本事業の研究期間は、2018年7月3日より2021年2月28日であり、主な事業スケジュールの概要を図Ⅱ-2に示す。

研究開発項目	2018年度				2019年度				2020年度			
	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q
I. 酸性熱水に対応した地熱発電プラントリスク評価システム開発												
I-1. 酸性熱水に対応した地熱発電プラントリスク評価システム開発												
II. 最適材料選定に係る技術開発												
II-1. 既存金属材料に係る腐食データベースの開発												
II-2. 高温・低pH環境における金属材料腐食試験												
II-3. 高温・低pH環境下における既存材料選定の研究												
III. 薬注法・シミュレーションによる腐食対策技術開発												
III-1. 酸性熱水に係る対策技術に係る調査												
III-2. 実坑井試験によるインヒビターの腐食防止効果の検証												
III-3. 腐食シミュレーションによる予測技術の開発												
検討委員会												

図 II-2 研究開発のスケジュール

(2.2.4) 研究開発の実施体制

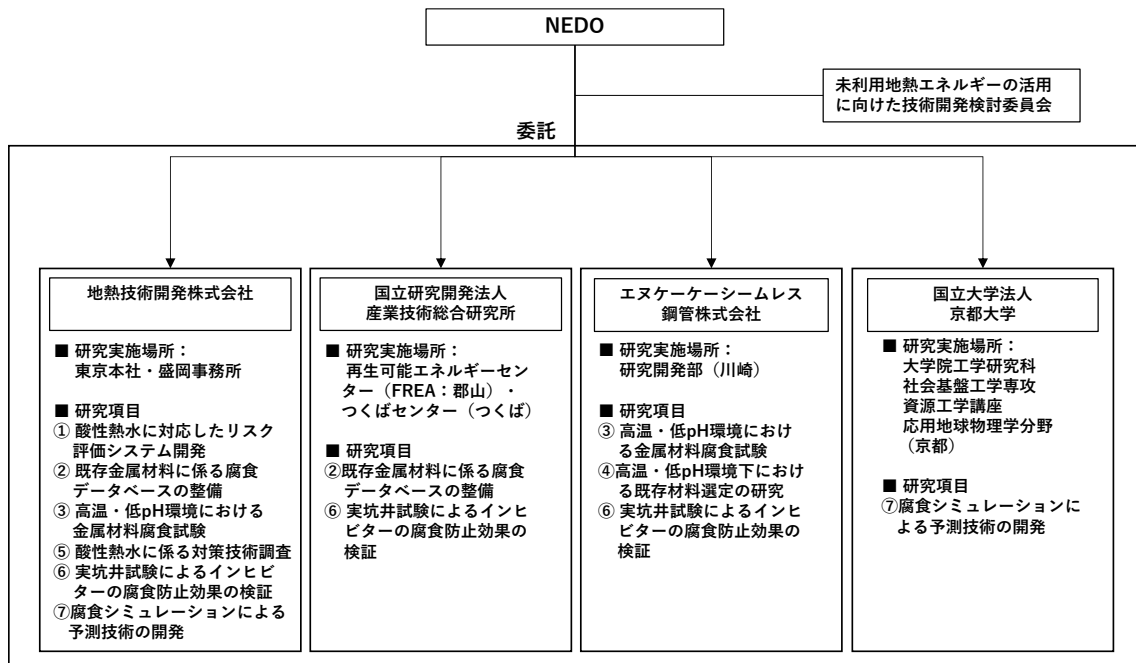


図 II-3 研究開発の実施体制

(2.2.5) 事業の管理運営

表Ⅱ-2 未利用地熱エネルギーの活用に向けた技術開発 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
副委員長	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 ～2020年3月	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 2020年4月～	桑野 恭	東北自然エネルギー株式会社技術本部 地熱事業部 課長

Ⅲ. 研究開発成果について

本事業では比較的データの少ない高温・低 pH 環境における金属材料耐腐食性能データ、ならびに酸性対策技術を基に、酸性熱水に対応した地熱発電プラントリスク評価システムを開発し、地熱開発事業者が酸性熱水を地熱資源として活用する上で、必要となる情報を提供できるシステムを開発することを目的とした。

① 酸性熱水に対応した地熱発電プラントリスク評価システム開発

地熱発電プラントリスク評価システムを構成する機能として、腐食速度予測技術、論文データベース、経済性評価モジュール、ならびに、腐食速度データのグラフ表示機能を開発した。各モジュールは、新たに Visual Basic C#によるソフトウェア化を行い、システムの統合化を完了した(図4)。開発した地熱発電プラントリスク評価システムを用い、過去の事例による腐食速度・経済性評価等の検証を行った。

② 既存金属材料に係る腐食データベースの整備

金属材料腐食・過熱蒸気井等の材料腐食関連の論文データベースの構築を実施した。データベース化にあたり、各論文より書誌情報、データ選択を行うための要素として、キーワード、論文内容、腐食対策、試験場所、を抽出するとともに、腐食試験条件として温度条件、pH条件、溶存成分、金属材料の各パラメータの整理を完了した。検索プログラムの製作を完了し、リスク評価システムへの統合を行った。昭和60年度サンシャイン計画研究成果報告書 地熱用材料の開発に関する研究、および、本事業成果による腐食試験データをデータベース化し、各金属材料の腐食速度等をグラフ化す

る機能を追加した。

熱水フロー式腐食試験装置を用いた腐食試験，葛根田で実施した腐食試験での金属材料腐食重量変化，化学組成変化より Cr 当量を用いた腐食速度予測式の改良を行った。

③ 高温・低 pH 環境における金属材料腐食試験

熱水フロー式金属材料腐食試験装置を用い，K55，TN80Cr13，TN95Cr13S，TN125Cr13U，17Cr を対象とし，pH2.5，3.0，3.5，温度 150℃，250℃，300℃，350℃の条件で試験を実施した。その結果，温度が最も高い 350℃において腐食速度が速くなる予測を立てていたが，実際には 300℃，250℃の方が腐食環境的に厳しいとの結果が得られ，腐食速度予測式改良のための有意義な基礎データを得た。また，米国ガイザーズの生産井を使用した過熱蒸気井における低 pH 凝縮水による腐食試験を実施し，各金属材料における全面腐食速度，孔食に係るデータを取得した。今後，高エンタルピーの地熱資源開発を進める上での材料面からの基礎データを得ることができた。

④ 高温・低 pH 環境下における既存材料選定の研究

③で判明した中間温度（250℃程度）において最も腐食状況が厳しくなる現象について，地化学シミュレーションにより地熱流体の pH に及ぼす硫酸， NCG 量， Cl^- 量の影響を系統的に調査し，地熱流体の高温における pH 近似式を確立した。熱水フロー式金属材料腐食試験で得た腐食速度データについて，試験温度および試験温度における pH（pH 近似式による）で回帰分析し，腐食速度予測式を確立した。熱水フロー式金属材料腐食試験データにより材料選定チャートの改良を行った。

⑤ 酸性熱水に係る対策技術調査

環境適合性の高いインヒビターとして，6 種類のインヒビターについてスクリーニング試験を実施し，有望なインヒビターの抽出を実施した。選定したインヒビターに対し，過熱蒸気環境を含む室内試験を実施した。pH3.0，200℃環境においてインヒビターを適用した実験を行った結果，隙間腐食に伴う腐食生成物による腐食が確認され，隙間腐食に対する適用可能性が今後の課題として挙げられた。選定したインヒビターに対して，室内試験結果，葛根田での実際の還元熱水を使用したインヒビター性能試験を評価し，ランニングコストを含め取りまとめを実施した。

⑥ 実坑井試験によるインヒビターの腐食防止効果の検証

“フロー式ポータブル材料腐食試験装置”を用いたインヒビター性能評価に係る実証試験を葛根田地熱地域の還元熱水を対象とし，2020年6月15日～6月26日にかけて実施した。選定したインヒビターを使用し，インヒビター濃度の変化に伴う腐食速

度に係るデータ、クーポンの腐食状況に係るデータを取得した。また、インヒビターを使用しない条件での腐食データを取得し、腐食速度予測式の開発、ならびに腐食シミュレーションにおいて活用した。

⑦ 腐食シミュレーションによる予測技術の開発

流れ場の乱れの影響で壁面の損傷（流れ加速型腐食）が発生する配管内オリフィスのケースを対象に、流れ場による壁面剪断応力を用いる予測式を格子ボルツマン法による巨視的シミュレーションを適用し、オリフィス配管の局所的な減肉、配管のエルボー部に発生する腐食現象をシミュレーションにより再現した。その結果、流れ場の発生させる壁面剪断応力により、オリフィス配管の局所的な減肉、ならびにエルボー部前後に局所的な減肉が発生することを再現した（図5）。また、エルボー部に腐食の発生した配管内でスケール成長させるシミュレーションを行った結果、エルボー部の下流側で腐食を補うようにスケールが付着することを確認した。更に、絶対時間をシミュレーションに組み込めるよう、腐食・スケール付着双方の実験データ取り込みの技術を確立した。葛根田地熱地域での腐食試験結果を用いることにより、他の材質のパイプの腐食可視化を行った。また、スケールの生成条件の検証を実施し、腐食リスクを低減する条件を検証した。

配管等表面での重金属腐食現象をモデル化するため、熱水の化学性状をベースとした Sb, As 鉱物の存在状態に係る熱力学データの収集・地化学シミュレータへの組み込みを行った。As, Sb を対象とした熱力学モデルに基づく pH-水素フガシティによる安定状態図から、重金属の沈積に係る地化学的状況の再現を行った。葛根田での実証試験条件に対するモデル化を実施し、Sb, As の生成機構を解析し、重金属腐食条件について明らかにした。

システムの概要

■ 概要

本成果は、産業技術総合研究所 旧東北工業技術試験所で実施されたランシヤイン計画研究における膨大な地熱に係る腐食データベースに、新たに実施した新規材料（地熱での利用実験の少ない材料）の腐食試験データを加え、酸性熱水腐食を適用する上で必要となる情報をリスク評価システムとして統合化したソフトウェアです。酸性熱水の利用を検討される地熱開発事業者の方々が、腐食に係る基本的な情報を簡単にアクセスできることを目的に開発されています。

リスク評価システムに含まれる機能は以下の通りです。

■ 機能

- 機能1：金属材料腐食速度試算
- 機能2：金属材料選定チャート
- 機能3：金属材料による経済性評価
- 機能4：材料腐食速度データベース
- 機能5：腐食に係る文献データベース

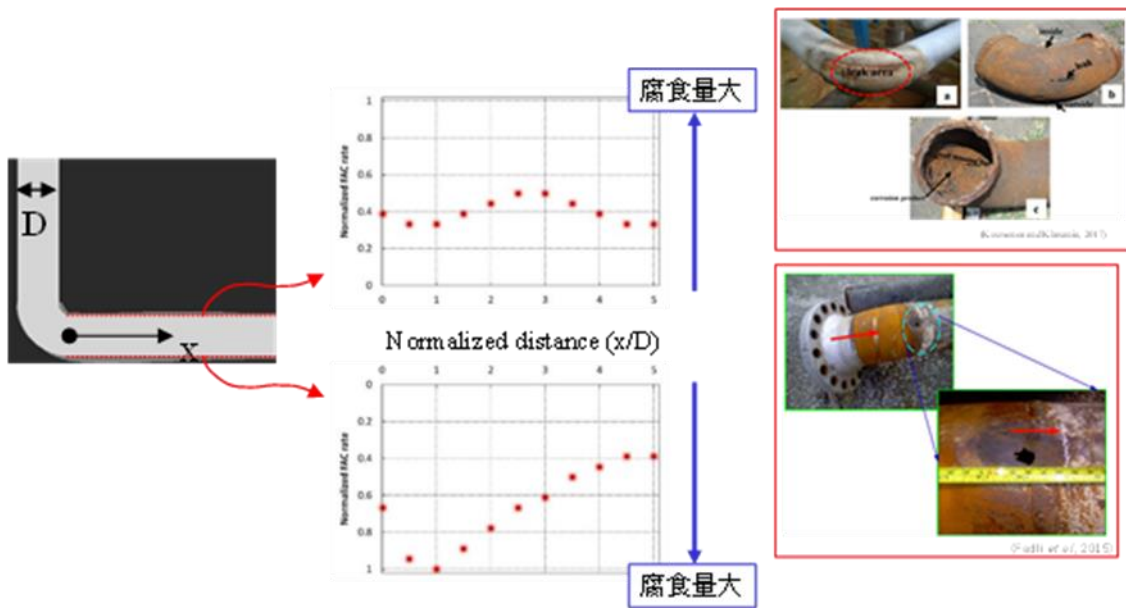
地熱発電プラントリスク評価システム

国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構

地熱発電技術研究開発／地熱エネルギーの高度利用化に係る技術開発／未利用地熱エネルギーの活用に向けた技術開発（在来型地熱腐食における未利用酸性熱水活用技術の開発）」成果

事業年度	2018～2020年度	お問い合わせ	
委託先	地熱技術開発株式会社	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	担当：採産部 佐藤寛文	
	エヌケーシステムズ興産株式会社	TEL 03-5541-9072	
	国立大学法人京都大学	E-mail: msato@geori.co.jp	

図Ⅱ-4 開発した地熱発電プラントリスク評価システムの概要



図Ⅱ-5 腐食シミュレーションによるエルボー部に対する解析結果

表Ⅱ-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
FY2018	0件	0件	0件	0件	0件	4件	0件	0件
FY2019	0件	0件	0件	0件	0件	6件	0件	0件
FY2020	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Ⅱ-4（１） 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 酸性熱水に対応した地熱発電プラントリスク評価システム開発	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 各モジュールを地熱発電プラントリスク評価システムに統合する。 ▶ 地熱発電プラントリスク評価システムのソフトウェア化を行う。 ▶ 過去の事例により、酸性熱水に対応した地熱発電プラントリスク評価システムを検証する 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 腐食速度予測技術，論文データベース，経済性評価モジュールを統合。 ▶ Visual C#によるプラントリスク評価システムのソフトウェア化を完了。 ▶ 白水越，Salluraにおける事例に対し適用し，リスク評価システムの評価を実施した。 	○
② 既存金属材料に係る腐食データベースの整備	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 新規の腐食関連データ・文献情報を追加し，項目①に反映させる。 ▶ 金属材料腐食試験データをもとにCr当量による腐食速度予測式の改良を行う。 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 論文のデータベース化検索プログラム製作を完了し，リスク評価システムへ反映。 ▶ 金属材料腐食重量変化，化学組成変化よりCr当量を用いた腐食速度予測式の改良を実施。 	○
③ 高温・低pH環境における金属材料腐食試験	<ul style="list-style-type: none"> ▶ “熱水フロー式金属材料腐食試験装置”を用いた金属材料腐食試験，米国ガイザーズでの過熱蒸気井での腐食試験を実施し，基礎データを取得する。 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 5種類の金属材料に対し，150℃，250℃，300℃，350℃腐食試験を予定通り実施。 ▶ 過熱蒸気井（米国ガイザーズ）での腐食試験は，2020年6月9日に終了し，露点腐食に係る腐食データを取得した。 	○
④ 高温・低pH環境下における既存材料選定の研究	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 熱水フロー式金属材料腐食試験結果及びガイザーズ過熱蒸気井腐食試験結果を基にした高温低pH環境における腐食速度予測式および材料選定チャートの改良。 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 地化学シミュレーションにより高温でのpH近似式を確立した上で，腐食試験データを基に，回帰分析により腐食速度予測式を確立した。また，材料選定チャートの改良を行った。 	○
⑤ 酸性熱水に係る対策技術調査	<ul style="list-style-type: none"> ▶ スクリーニングにより選定されたインヒビターについて，実験室での試験結果，ならびに国内での実証試験結果を取りまとめ，高温・低pH環境での適用性についてとりまとめる。 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 葛根田にて暴露試験を実施した試験片の解析結果，実験室での性能評価試験結果を踏まえ，インヒビターの適用環境，ランニングコスト評価を完了した。 	○

[最終目標に対する成果と達成度]

表Ⅱ-4（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	達成度
⑥ 実坑井試験によるインヒビターの腐食防止効果の検証	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 国内の酸性熱水を生産する地熱坑井において、インヒビターの腐食防止効果を検証するための実坑井試験を実施する。試験は項目⑤で検証したインヒビターのうち、腐食防止性能の高かったインヒビターについて実施する。 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 葛根田地域還元熱水を使用し、選定したインヒビターに係る性能評価試験を2020年6月15日～6月26日にかけて予定通り実施。 ➤ インヒビター濃度の変化に伴う、腐食速度に係るデータ、クーボン状況に係るデータを取得。 	○
⑦腐食シミュレーションによる予測技術の開発	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 流れ場による壁面剪断応力を用いる予測式を格子ボルツマン法による巨視的シミュレーションを適用し、実際の腐食やスケール成長のデータを活かす技術を開発する。 ➤ 実坑井試験にて得られた腐食データを基に、重金属スケールの生成条件の検証を実施する。また、腐食リスクを低減する条件の検討を実施する。 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ オリフィス配管の局所的な減肉、ならびにエルボー前後に局所的な減肉が発生することを再現し、更に、絶対時間をシミュレーションに組み込めるよう、腐食・スケール付着双方の実験データ取り込みの技術を確立した。 ➤ 葛根田での実証試験条件を対象とし、開発した重金属シミュレーションを用いたモデル化を実施。Sb, Asの生成機構を解析し、重金属腐食条件について明らかにした。 	○

IV. 事業化へ向けての見通しと取組みについて

(1) 酸性熱水の資源化に向けたプラントリスク評価システム活用の方向性

これまで熱水が酸性であることが判明した段階で、当該地熱資源の利用が断念されるケースが多く見られた。今回開発したプラントリスク評価システムでは、金属材料の腐食速度予測式より導かれた耐用年数とコストの面から適用の可否に係る予察を行うことが可能となることから、酸性熱水資源の活用が進むことが期待される。ここでは、プラントリスク評価システムの活用に向けた方向性を図6に示すとともに、その概要を以下に示す。

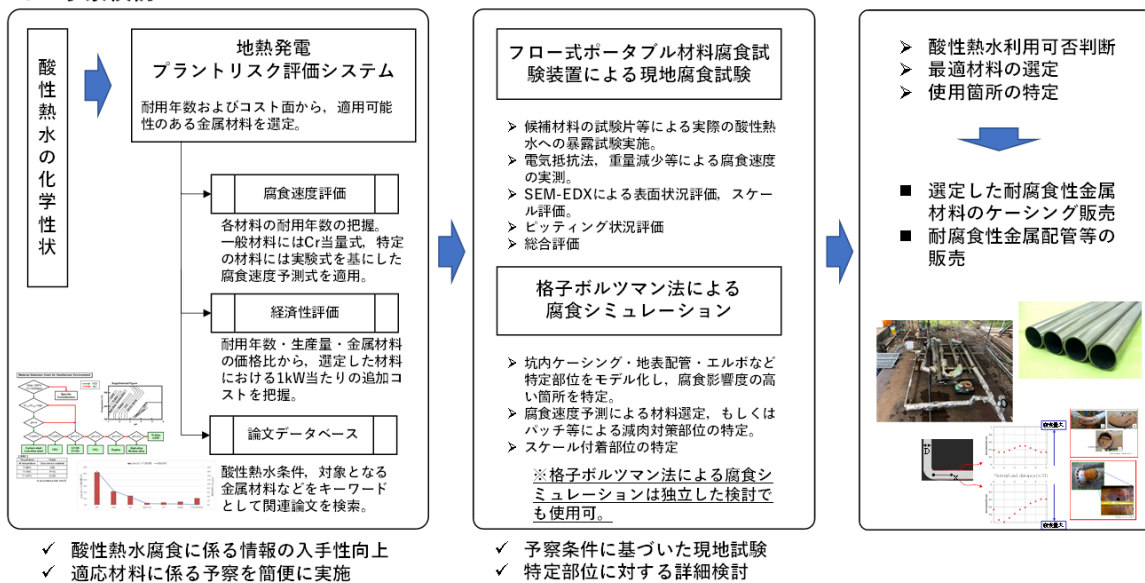
■ 予察フェーズ

- ① 酸性熱水が生産した場合、もしくは、既に酸性貯留層であることが分かっている地域などに対して開発検討を開始する場合などにおいて、事業者がプラントリスク評価システムを利用して、②の評価を実施することで開発方針に係る検討を行う。
- ② 具体的には、腐食速度予測による各種金属材料の耐用年数の把握。および耐用年数から試算される生産量を基に、金属材料の種類に対して 1kW 当たりの追加コストを試算する。
- ③ プラントリスク評価システムの結果をもとに、当該地域での開発可能性、および適用可能性のある材料の予備選定を行う。

■ 詳細検討フェーズ

- ④ 予察フェーズでの検討の結果、詳細検討の実施判断がなされた場合、フロー式ポータブル材料試験装置 (NEDO プラントリスク事業で開発) 等を用いて選定した材料に対して、現地での腐食試験を実施し、腐食速度の実測、表面解析により孔食等の状況を詳細評価し、耐腐食性能・コスト面を含めた最適な材料を選定する。
- ⑤ 更に、坑内ケーシング、地表配管、エルボー、圧力容器など、腐食の影響を受けやすい箇所に対して、格子ボルツマン法による腐食シミュレーションを適用することで選定した最適材料を特に使用すべき箇所の特定制やパッチ等の腐食対策を施すべき箇所を特定する。
- ⑥ これらの結果を総合することで、地熱開発事業者が酸性熱水資源の利用方針を決定する一助とする。また、フロー式ポータブル材料試験装置を用いた現地腐食試験、腐食シミュレーション等のコンサルタント業務、およびケーシングを始めとした販売事業につなげていく。

地熱発電プラントリスク評価システム
での予察検討



図III-1 プラントリスク評価システムを用いた酸性熱水活用に係る評価の概念図

(2) 将来的な酸性熱水活用の可能性と対策技術への期待

地熱デベロッパー各社に対し、酸性熱水資源の現状と酸性熱水が生産された場合の開発意思、ならびに期待する対策技術についてのアンケートを実施した結果、酸性熱水が噴出した経験のあるデベロッパーは6社であったが、酸性熱水を利用した経験のあるデベロッパーは3社であり、現状利用しにくい資源であることが伺える。

酸性熱水が存在する地域での賦存割合は不明のデベロッパーが多いが、回答のあった地域では約5%となっている。更に、蒸気生産量に対するポテンシャルとしては約10%であった。すなわち、日本の地熱資源量(2,347万kW)に対して117万kW、2030年エネルギーミックスの目標である140~155万kWに対して、7万kW程度のポテンシャルが少なくとも見積もられると期待される。

このような環境の中、デベロッパーの開発の意向は、良い技術があればすぐにでも開発を進めたいデベロッパーは10社中5社、現状では計画は無いが、将来的には検討したいと考えているデベロッパーは9社であり、多くのデベロッパーにて開発の意欲がうかがえる結果であった(表5)。また、期待する対策技術としては、コスト・耐用年数に見合う金属材料の使用、腐食箇所のシミュレーション予測技術、pH調整が多く挙げられており、本技術開発で開発したプラントリスク評価システムによる最適材料の選定、および格子ボルツマン法による腐食シミュレーション技術は今後の酸性熱水の活用に向けて利用されていくことが期待される。なお、アンケートに協力いただいたデベロッパーに対し、プラントリスク評価システムの配布希望調査を行った結果、10社中9社より配布希望があり、期待度が伺える結果となったことから、将来的な未利用酸性熱水資源の活用の進展

が期待される。

表Ⅲ-1 酸性熱水の開発に対する事業者の意向

項目	事業者数
①現状の技術で対応可能、賦存域の開発を進める。	1
②積極的に最新の対策技術を検討し開発を進めたい。	2
③現状では難しいが、低コスト化等良い技術があればすぐにでも開発したい。	2
④当面の開発計画はないが、将来的には開発したい。	4
⑤酸性熱水の開発は考えていない。	1

以上

個別テーマ (2.3)

(2)地熱エネルギーの高度利用化に係る技術開発

(2.3) 酸性熱水を利用した地熱発電システム実現に向けた耐酸性・低付着技術の研究開発

委託先：富士電機株式会社、国立研究開発法人海洋研究開発機構、
国立大学法人東海国立大学機構 名古屋大学

II. 研究開発マネジメントについて (事業の計画内容)

(2.3.1) 事業目的

日本における地熱資源全体に対して、酸性熱水を含むものは最大 30%程度と推測されている。よって、酸性熱水を利用できるようになれば、利用可能な地熱資源量を $100\%/70\%=1.42$ 倍化するとともに開発リスクを最小化することができる。よって、現在開発対象とされている発電容量は 350MW 程度であるが、これを 500MW に引き上げることが可能となる。また、再掘削などの開発リスクを低減することで地熱開発拡大が狙える。

酸性熱水への対策のため、これまでに①酸性熱水性状の把握、②酸性熱水による地熱設備毎の腐食挙動の調査、③腐食対策技術の調査、④酸性熱水利用の経済性評価などが行われている。しかしながら、有効な対策として挙げられているのは耐食合金への材料変更や薬品による中和程度であり、耐食性に関して酸性熱水利用に耐えうる水準に達していない。酸性熱水利用のための要素技術開発を実施することで、国内における地熱発電システムの導入の拡大を狙う。

(2.3.2) 事業概要

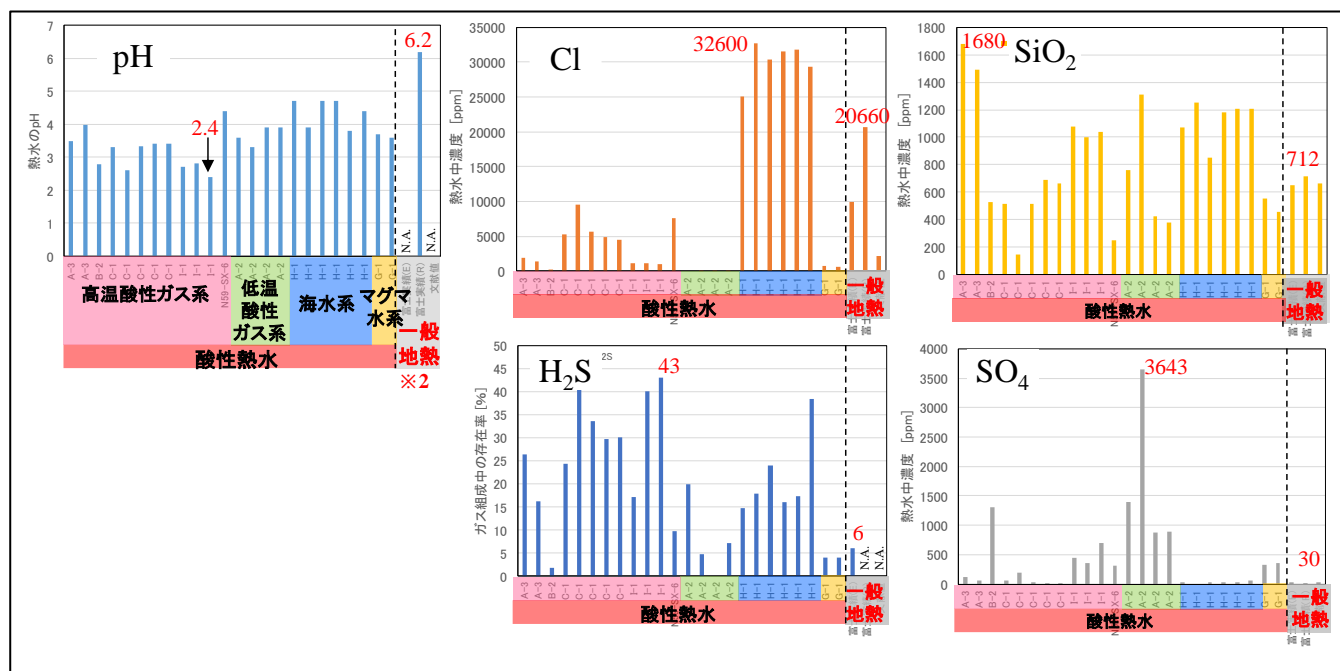
酸性熱水では腐食性が従来よりも非常に過酷であることが予想されている (図 II-1)。よって、酸性熱水を利用した発電システムの実現のためには腐食に対する対策が必須である。また、タービンなどの地上設備においては高温高压の地熱蒸気の温度・圧力が低下する際に、蒸気中に溶解していたシリカが析出し流路閉塞する (シリカスケーリング) ことで、発電所停止の要因となる。これらの損傷モードは長期間に渡り発電所を停止させ、稼働率を下げたまま地熱発電プラントの発電量を大きく低下させることから、優先して取り組むべき課題である。

そのため、本研究では①耐食性の向上、②シリカスケールの付着防止に向け、材料を含めた表面改質プロセス開発、および製造基盤技術を確立する。具体的には、地熱発電システムの構成機器の中でも急激な蒸気温度・圧力変化により最も腐食環境が激しく、スケール付着が発生するコンポーネントであり、また、蒸気の熱エネルギーを回転エネルギーに

変換する最重要機器である蒸気タービンを題材に飛躍的な耐食性と非付着性を付与する。最も厳しい環境にあるタービンの課題が解決できれば、他の発電機器についても同様に課題が解決可能であると考える。

地上設備において、蒸気タービンの過酷な腐食部位に対して飛躍的な耐食性を付与するために、以下の基礎技術開発により、これまで実現できていないフラッシュ方式酸性熱水利用地熱発電の実現を目指す。図II-2に地熱蒸気タービンへの各技術の適用箇所を示す。表II-1に開発目標を示す。

- 項目1. 材料に対して腐食環境遮断を行う「レーザを用いた金属/フッ素樹脂直接接合」
- 項目2. スケール非付着化のための「炭素系薄膜による低付着表面改質技術」
- 項目3. 腐食の要因となる蒸気中の水滴の高効率捕集のための「粒子法による水滴挙動計算」



図II-1 酸性熱水における想定環境
(酸性熱水の対策技術等に関する調査研究, NEDO, 1993 より抜粋)

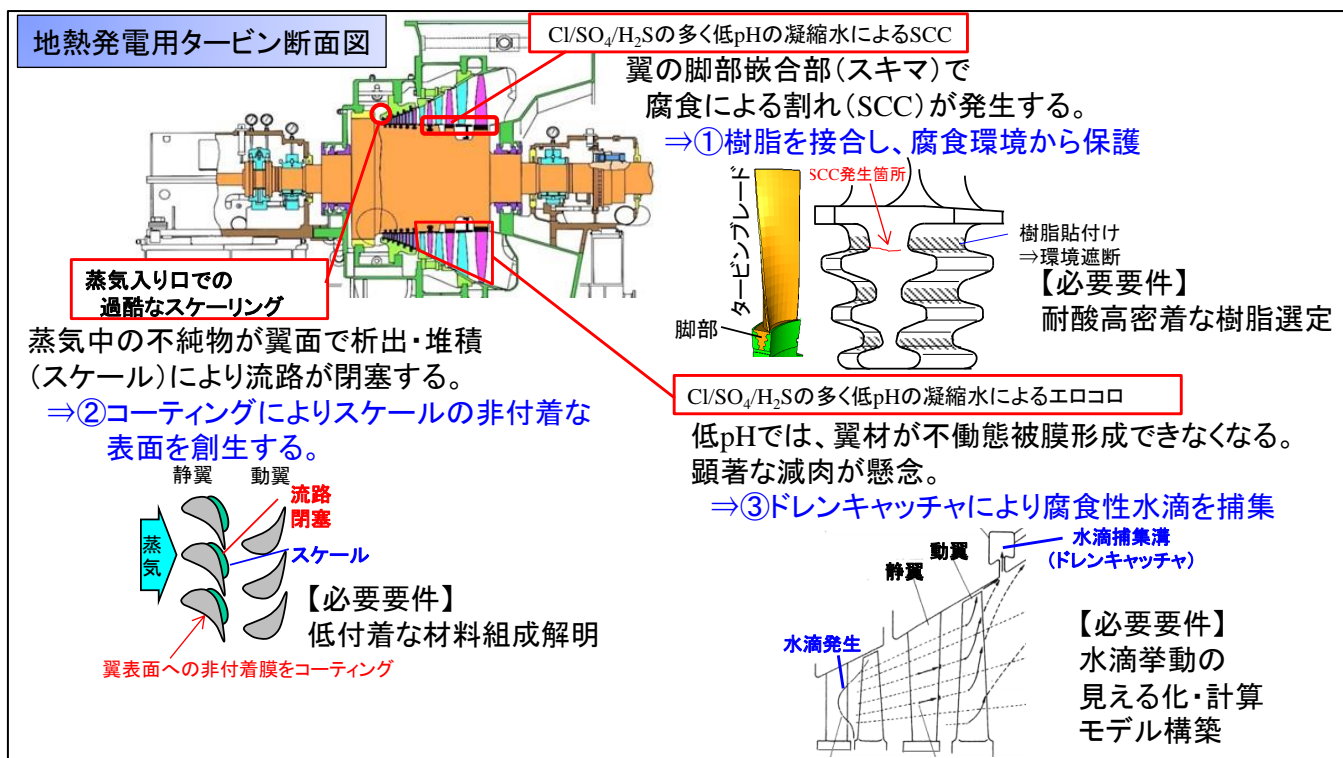


図 II-2 地熱タービンに対する各技術の適用先

表 II-1 研究開発目標と根拠

研究開発項目	目標	選定理由
(1)耐食性向上: レーザを用いた金属/フッ素樹脂接合技術の研究開発	実機模擬環境における寿命確保 【最終目標】 ・酸性熱水環境にて腐食寿命を1000時間以上とする。 ・密着強度: 界面剥離をなくす。 ・施工コスト: 5万円/本以下とする。	富士電機では、地熱環境を基に応力、環境条件での加速により過酷な試験条件を設定し、信頼性試験を実施している。実機の腐食状況から、加速条件での1000時間試験は実機20年以上に相当すると評価されている。 (更新) ⇒実験的に算出した酸性熱水環境での加速係数から、1000→3000hrに変更。3000hrで12年評価可。従来地熱でも10年程度で翼交換することがあるため、寿命12年を目標とした。
(2)スケール付着抑制: 炭素系薄膜による低付着表面改質技術の研究開発	炭素膜によるシリカ付着抑制 【最終目標】 ・シリカ付着特性: シリカ付着を従来比1/8とする。 ・施工コスト: 10万円/本以下とする。	スケールリングが激しいプラントでは、半年ほどでスケールリングによりタービンが停止することがある。タービン停止までの期間を半年から4年(通常の点検期間)に延長することが求められる。
(3)耐食性向上: 粒子法に基づく水滴捕集機構位置の最適化	水滴挙動計算に基づくドレンキャッチャーの位置最適化および捕集効率の検証 【最終目標】 ・水滴捕集量を10%以上向上させる。	腐食性凝縮水の排出により上記2研究項目の効果を最大化。 【副次効果】効率向上 湿度1%上昇につき1%効率低下 水滴除去により効率向上

(2.3.3) 事業スケジュール

事業スケジュールを図Ⅱ-3に示す。

研究開発項目	2018年度				2019年度				2020年度			
	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q	1Q	2Q	3Q	4Q
1. 金属/フッ素樹脂接合技術 ①接合候補材の選定 ①-1: 材料調査 ①-2: 接合性評価による材料選定 ②接合高密着化 ②-1: 接合プロセス最適化 ②-2: 耐食性の検証												
2. 炭素系薄膜による低付着表面改質技術 ①炭素膜の可能性見極め ①-1: 水素含有による低付着効果の検証 ②シリカ低付着化技術の開発 ②-1: 水素量と欠陥量の関係解明 ②-2: 欠陥量可変成膜法の確立 ②-3: 炭素膜組成最適化 ②-4: 低付着性能の検証												
3. 粒子法に基づく水滴捕集機構位置の最適化 ①液膜流動と液滴の飛散挙動の計算モデルの構築 ①-1: 性状等の調査 ①-2: 翼の回転と形状に関連する液滴コードの開発 ①-3: タービン翼上の液滴流動コードの開発 ②水滴飛散を模擬した試験評価法の確立 ②-1: 水滴測定法の確立 ②-2: 仕様検討 ②-3: スピントスタ改造 ③ドレンキャッチャの位置最適化 ③-1: 水滴捕集性能の検証												

図Ⅱ-3 研究開発のスケジュール

(2.3.4) 研究開発の実施体制

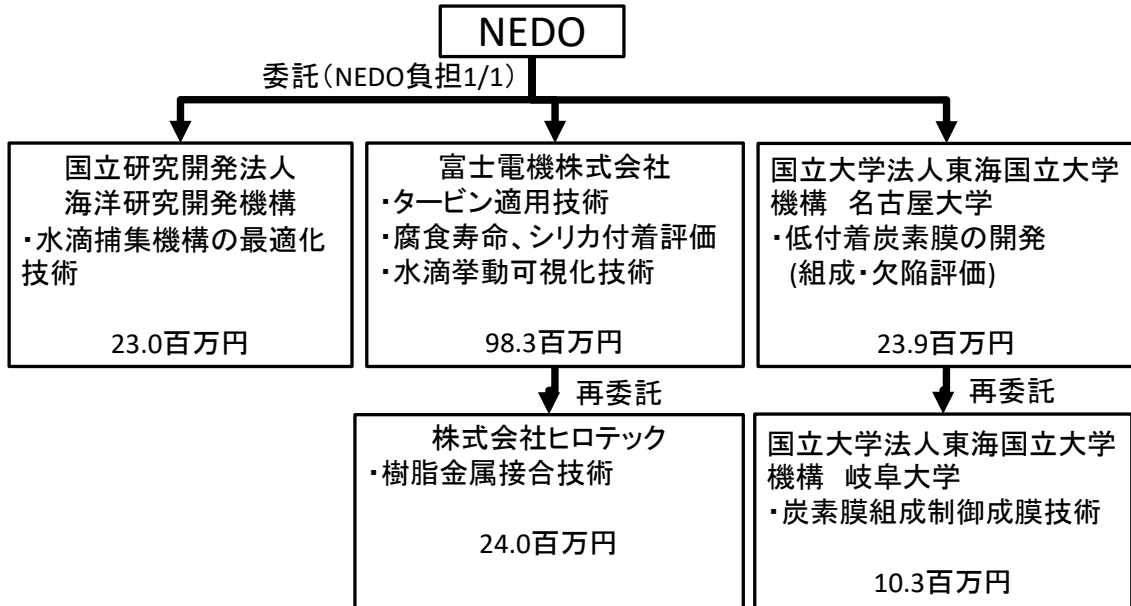


図 II-4 研究開発の実施体制

Ⅲ. 研究開発成果について

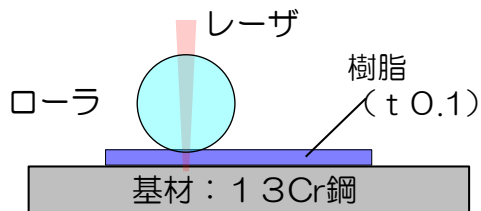
本事業では、酸性熱水の活用時に想定される腐食、スケーリング対策に向け、下記3項目の研究開発を実施した。酸性熱水利用地熱タービン実現に向けた必要機能（腐食対策、スケール対策）のための要素技術の確立を完了した。

- (1) SCC 対策：レーザを用いた金属/フッ素樹脂直接接合
- (2) スケール対策：炭素系薄膜による低付着表面改質
- (3) 腐食対策：粒子法による水滴挙動計算

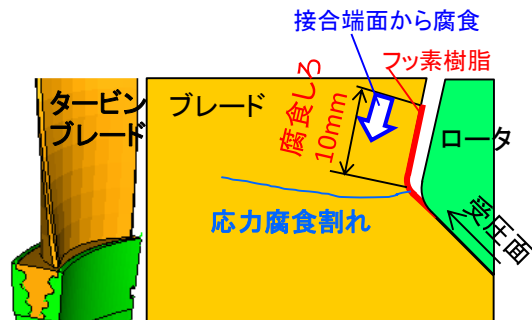
(1) レーザを用いた金属/フッ素樹脂直接接合

図Ⅲ-1 にタービン材に対する樹脂接合プロセスと接合体例を示す。タービン材に0.1mmの樹脂を置き、ローラで加圧しながらレーザでタービン材/樹脂の界面を加熱することで強固な接合行われる。図Ⅲ-2 にタービン翼への樹脂貼付け方法を示す。タービン翼の割れ発生位置よりも広範囲に樹脂を貼付けることで、腐食しろを設ける。腐食しろが全面的に腐食されたタイミングを寿命と定義した。

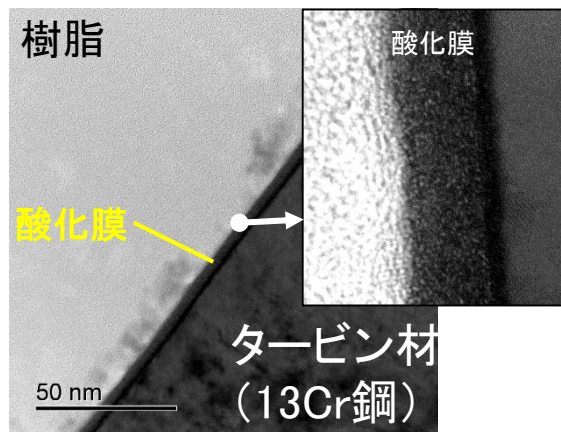
図Ⅲ-3 に樹脂とタービン材（金属）の断面図を示す。樹脂接合界面は金属表面の酸化膜を介して、樹脂と接合されており、酸化膜との接合性の良い構造を有する樹脂種の選定が重要となる。



図Ⅲ-1 接合プロセス
付け方法

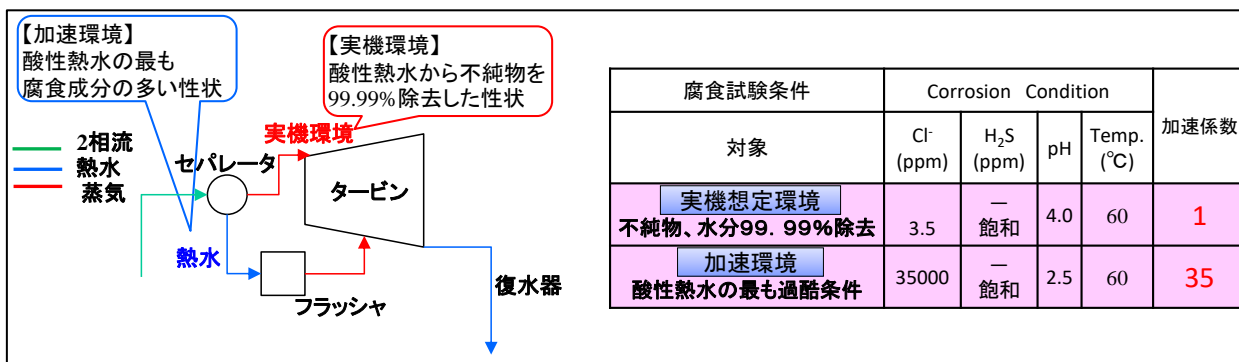


図Ⅲ-2 タービン翼への貼

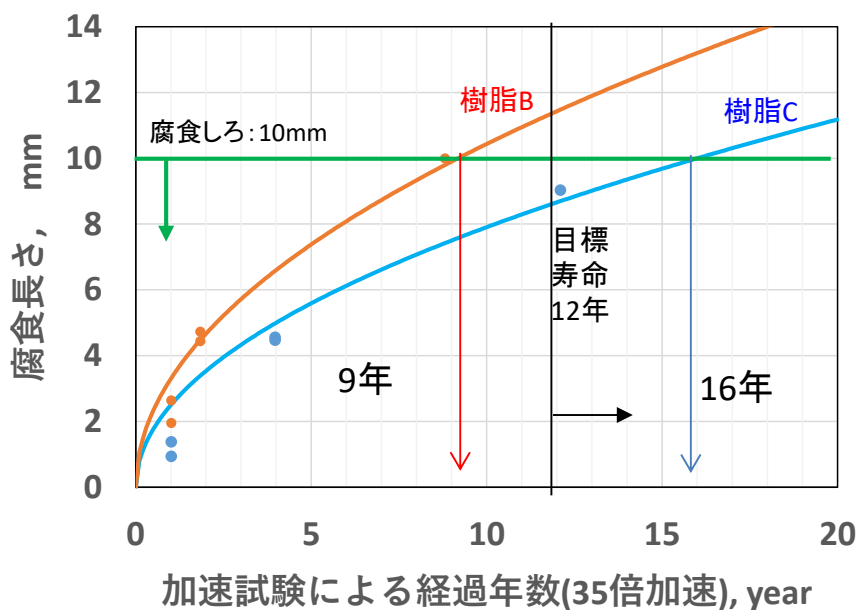


図Ⅲ-3 樹脂/金属接合界面

レーザの透過性、耐酸性、入手性から、候補となる樹脂を3種（以下樹脂A, B, Cと表記）を抽出した。樹脂A, B, Cについて、高密着が得られるよう、レーザによる接合加熱温度の最適化、加圧力の最適化、タービン材の表面状態の最適化を行った。特に耐食性の優れる樹脂B, Cについて、3000hrの腐食試験により寿命評価を実施した。図III-4に腐食試験環境を示す。地熱ではタービンに蒸気が流入する前に、セパレータで汽水分離を行い、腐食成分の大半は熱水側に除去される。よって、図II-1から想定される熱水環境を加速環境、蒸気に想定される腐食環境を実機環境として定義し、腐食試験から加速係数を算出した結果、35倍であった。この加速環境における3000hr（ $3000\text{hr} \times 35 \approx 105000\text{hr}$ （約12年））の腐食試験結果を図III-5に示す。樹脂Cにおいて、16年相当の腐食寿命が得られ、目標を満足することを確認した。上記より、酸性熱水環境においてタービンに懸念されるSCC（応力腐食割れ）を防止でき、タービンの一般的な運用（4年毎の定期点検）で対応可能なSCC対策の要素技術を確立できた。



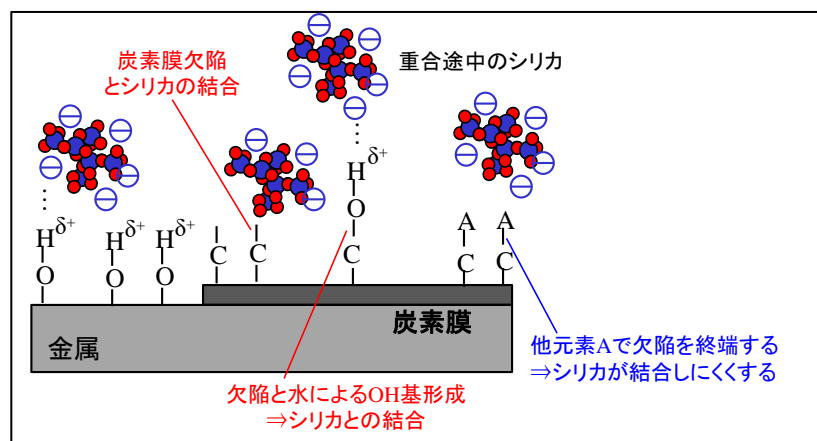
図III-4 腐食試験環境



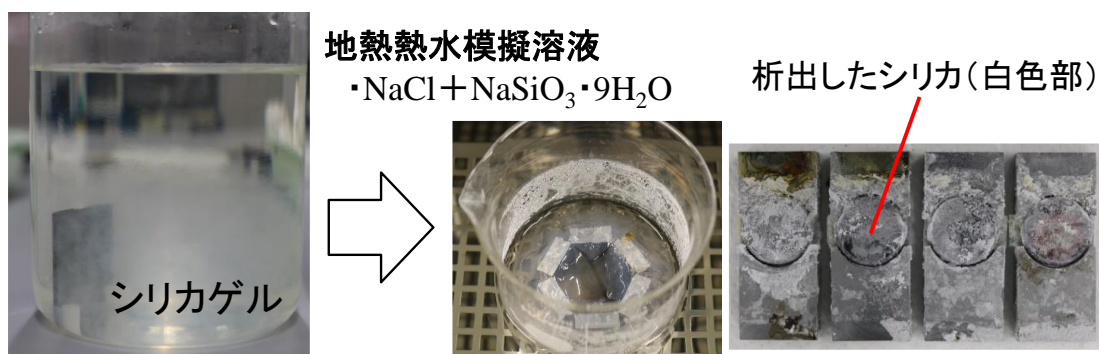
図III-5 腐食試験結果

(2) 炭素系薄膜による低付着表面改質

図Ⅲ-6に金属表面と炭素膜表面におけるシリカ付着機構の想定図を示す。金属表面は水と反応することで多数のOH基が発生することが想定される。OH基はわずかに正電荷を帯びており、重合途中のシリカは負電荷を帯びる場合がある。よって、これらが電氣的に引き合うことでシリカが付着する可能性がある。そこで、金属よりも反応性の低い炭素膜によりシリカの付着部位の低減に取り組んだ。炭素膜においても欠陥が存在する場合があります、この炭素膜欠陥が金属表面同様にOH基を形成する可能性がある。そこで、炭素膜の成膜時に他元素を導入し、炭素による欠陥を終端することで更なるシリカの低付着化を狙った。図Ⅲ-7にシリカ付着試験法を示す。地熱熱水を模擬するため、シリカの元となるケイ酸を含溶液中にタービン材と炭素膜を浸漬後、溶液を乾燥させ、シリカを析出付着させる手法を用いた。

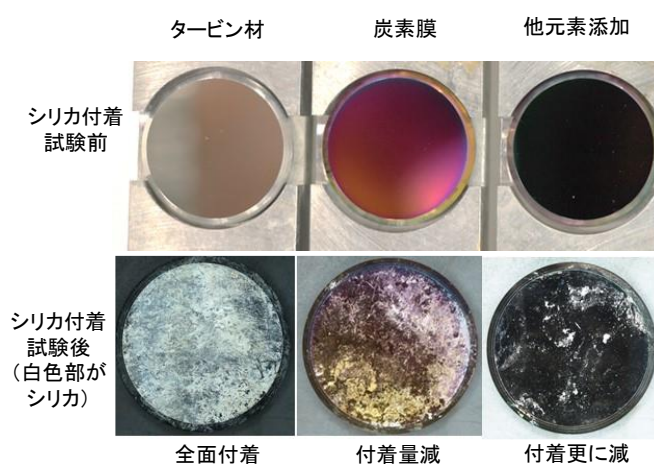


図Ⅲ-6 シリカ付着機構の想定図

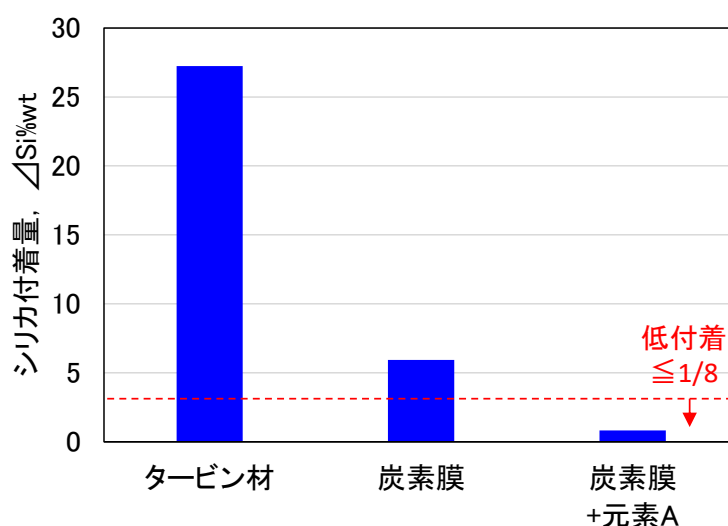


図Ⅲ-7 シリカ付着試験法

図Ⅲ-8 にシリカ付着試験前後のシリカ付着の様子を示す。タービン材では全面的にシリカが付着し、全体が白色に見える。炭素膜では、シリカの付着面積が低減しており、素地が見える領域が見られる。他元素を含有させた炭素膜では更にシリカ付着面積が低減し、大部分で素地の色が見られる。図Ⅲ-9 に各材料におけるシリカ付着量を示す。シリカの付着量を SEM-EDX による成分分析によりシリカの主成分である Si 量を測定し、付着量とした。タービン材と比較して、炭素膜では約 1/5、炭素膜に他元素を含有したものは約 1/25 となることを確認した。炭素膜に他元素を含有した膜において、目標の低付着量 1/8 を満たすことを確認できた。上記より、酸性熱水環境においてタービンに懸念されるスケール付着を抑制でき、タービンの一般的な運用(4年毎の定期点検)で対応可能なスケール対策の要素技術を確立できた。



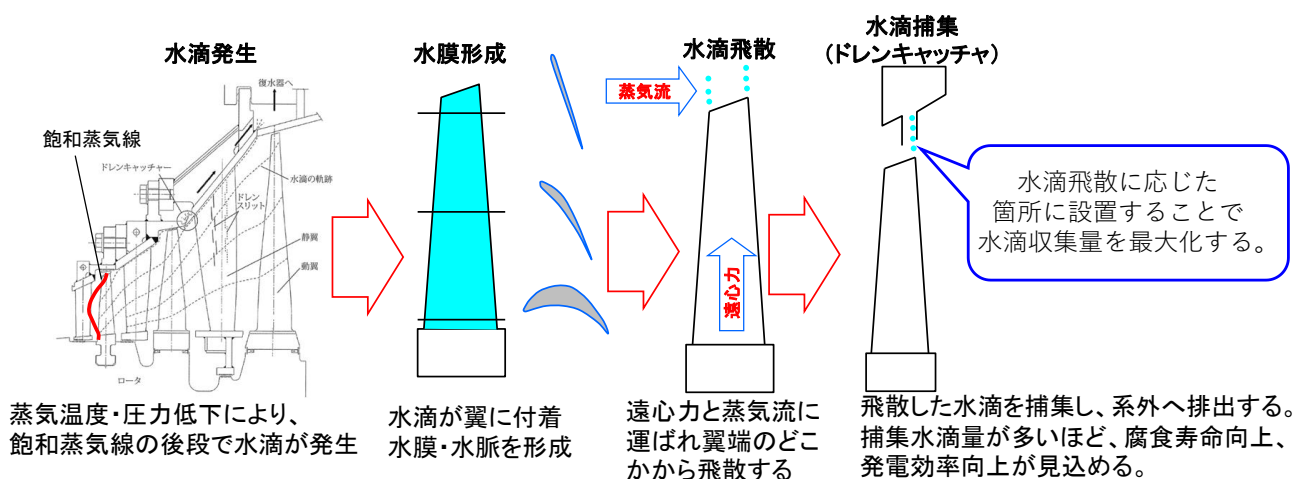
図Ⅲ-8 シリカ付着試験前後のシリカ付着の様子



図Ⅲ-9 各材料におけるシリカ付着量

(3) 粒子法による水滴挙動計算

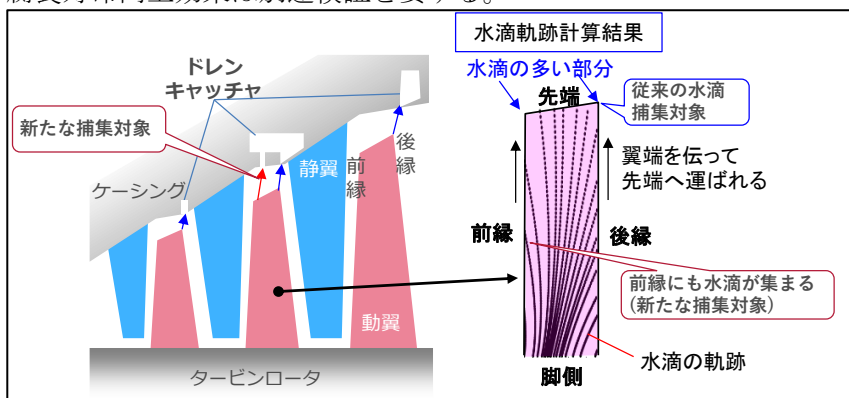
図III-10 にタービン内で発生する水滴飛散の概略図を示す。タービン内では蒸気回転力に変換する際に、蒸気温度・圧力が低下していき、飽和蒸気温度圧力を下回った際に水滴が凝縮する。タービン内で発生した水滴はタービン翼に付着したのち、蒸気流と遠心力によりタービン翼の先端から飛散する。この水滴は腐食成分が濃縮する可能性があること、発電効率の低下要因となることから、タービン系外への排出が重要となる。タービンケーシングにはドレンキャッチャーと呼ばれる水滴を排出する構造があり、水滴の飛散位置・量を見える化し水滴の飛散量が多い箇所にはドレンキャッチャーを設けることで腐食寿命向上とともに発電効率向上が見込める。そこで、水滴飛散の計算モデルの構築と、タービンを模擬した回転試験体による水滴飛散量の実測を行った。



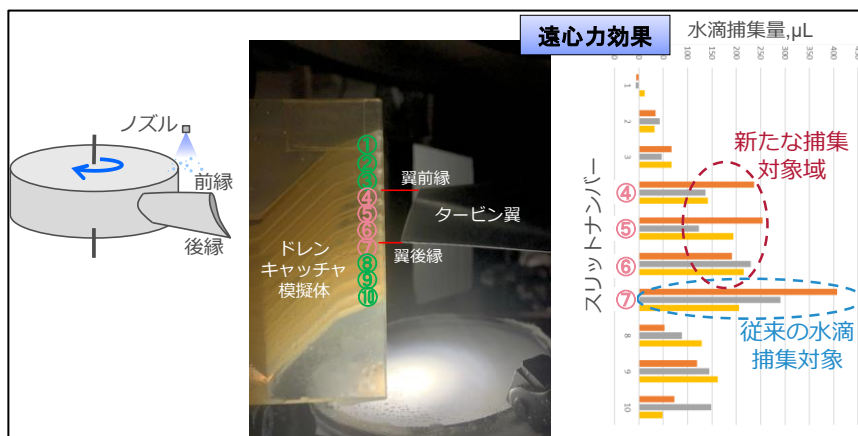
図III-10 タービン内での水滴発生と飛散までの概略図

図Ⅲ-11 にタービンの遠心力と蒸気流を考慮した計算モデルによるタービン翼表面における水滴移動軌跡を示す。大部分の水滴は翼の後縁側に運ばれる様子が見られる。翼の先端に到達する前に前縁もしくは後縁に到達した水滴は翼から脱離するものと翼端を伝って先端に運ばれるものがあるものと考えられることから、翼先端では前縁部と後縁部にて、水滴量が多くなるものと推察される。従来は主に、翼後縁から飛散する水滴を捕集しており、翼前縁が新たな捕集対象となる可能性が示唆された。

図Ⅲ-12 にタービンを模擬した回転試験体における水滴飛散分布を示す。複数のスリット分けされたドレンキャッチャ模擬体にて、水滴捕集量を N=3 で測定した。翼後縁に当たる 7 番スリットで最も水滴量が多く、翼前縁 4 番スリットは 5, 6 番スリットとほぼ同等の量となった。本回転試験では、蒸気流の効果は模擬できておらず、遠心力のみの効果をみており、実際には 5, 6 番よりも 4 番（翼前縁）において水滴量が多い可能性がある。従来捕集していた水滴量を 7 番（翼後縁）、新たに捕集できる水滴量を 4 番（翼前縁）と仮定すると $4 \text{ 番} + 7 \text{ 番} / 7 \text{ 番} = 1.57$ となる。よって、新たに翼前縁の水滴を捕集対象とすることで最大で 57% の水滴捕集効果が得られる可能性がある。上記より、酸性熱水環境においてタービンに懸念される腐食性凝縮水による腐食を防止でき、かつ、タービン効率が向上できる要素技術を確立できた。なお、本成果における腐食性凝縮水除去量による腐食寿命向上効果は別途検証を要する。



図Ⅲ-11 水滴挙動の計算結果（蒸気流＋遠心力）



図Ⅲ-12 水滴飛散量の測定結果（遠心力）

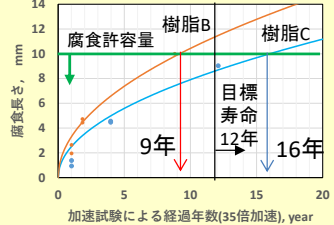
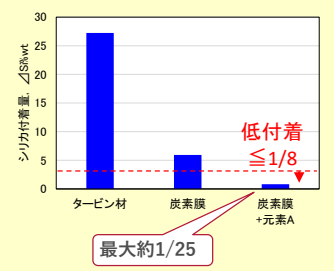
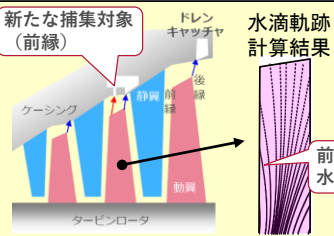
表Ⅲ-1 特許、論文、外部発表等

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
2018	0件	0件	0件	0件	0件	0件	0件	0件
2019	1件	0件	0件	0件	0件	0件	0件	0件
2020	1件	0件	1件	1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III-2 最終目標に対する成果と達成度

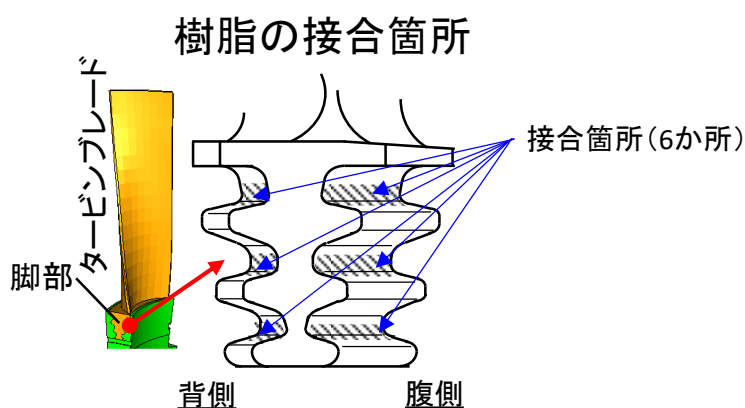
研究項目	成果	達成度
<p>レーザーを用いた樹脂/金属接合技術の研究開発</p>	<p>【最終目標】</p> <ul style="list-style-type: none"> 耐食性 酸性熱水環境にて腐食寿命を1000時間以上。 ⇒3000hr以上(12年相当) 密着強度: 界面剥離なし。 施工コスト: 5万円/本以下。 	<ul style="list-style-type: none"> 耐食性: 腐食寿命3000hrにて界面剥離なし@樹脂B ⇒樹脂Bで16年 施工コスト: 3.2~3.4万/本  <p>腐食長さ, mm</p> <p>加速試験による経過年数(35倍加速), year</p> <p>腐食許容量</p> <p>樹脂B</p> <p>樹脂C</p> <p>9年</p> <p>目標寿命 12年</p> <p>16年</p>
<p>炭素膜による低付着表面改質技術の研究開発</p>	<p>【最終目標】</p> <ul style="list-style-type: none"> シリカ付着特性 シリカ付着を従来比1/8とする。 施工コスト: 10万円/本以下とする。 	<ul style="list-style-type: none"> 低付着: 炭素膜中に他元素を含有することでシリカ付着量を最大1/20まで低減。 施工コスト: 上記膜構成にて2.6万円/本  <p>シリカ付着量, ΔSwt</p> <p>タービン材</p> <p>炭素膜</p> <p>炭素膜+元素A</p> <p>最大約1/25</p> <p>低付着 ≤ 1/8</p>
<p>粒子法による水滴挙動計算技術の研究開発</p>	<p>【最終目標】</p> <ul style="list-style-type: none"> 水滴捕集量を10%以上向上させる。 	<ul style="list-style-type: none"> 水滴捕集量: タービン構造を模擬した回転試験および計算にて、水滴飛散量が多い箇所を明確化。水滴捕集量が最大57%向上する可能性あり。  <p>新たな捕集対象 (前縁)</p> <p>ドレン キャッチャ</p> <p>ケーシング</p> <p>静置</p> <p>後縁</p> <p>前縁</p> <p>動置</p> <p>タービンロータ</p> <p>水滴軌跡計算結果</p> <p>前縁にも水滴が集まる</p>

IV. 事業化へ向けての見通しと取組みについて

(1) 実用化の見通し：開発技術のコスト評価

(1-1) レーザを用いた樹脂/金属接合

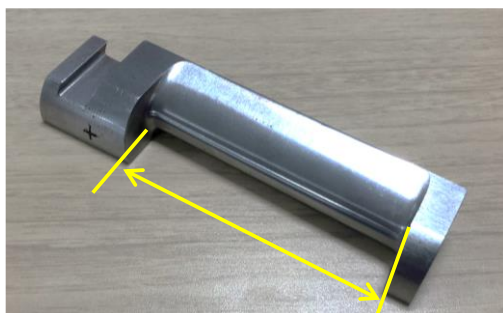
タービン翼脚部への施工を想定してコストを評価した。図IV-1に樹脂接合箇所を示す。試算の前提としては、翼1本に対して6か所接合、接合費、樹脂材料費から計算している。施工コストは翼1本あたり3.2～3.4万円となった。従来の地熱タービンでは腐食対策として、ショットピーニングと呼ばれる表面処理を行っており、この施工コスト以下となるため、実用性のあるコストであるものと考えられる。



図IV-1 タービン翼への樹脂接合箇所

(1-2) 炭素膜による低付着表面改質

スケール付着の激しい初段静翼への施工を想定してコストを評価した。図に翼の例を示す。試算の前提としては、翼面全面への施工、炭素膜成膜費、翼材料費、治具費から計算している。施工コストは翼1本あたり2.6万円となった。従来の地熱タービンでは、本成膜対象である初段静翼において、チタン翼を用いる場合があり、この施工コスト以下となるため、実用性のあるコストであるものと考えられる。



図IV-2 タービン翼への炭素膜成膜範囲

(2) 実用化に向けた取組：残課題と取組

本成果では酸性熱水利用地熱タービン実現に向けた要素技術の確立まで完了した。今後は実用化に向け、実機形状への適用技術を確認した後、実証による性能評価を行う計画である。下記に次フェイズとして想定している実機形状への適用技術における取組を示す。

(2-1) レーザを用いた樹脂/金属接合

実翼の脚部は図Ⅱ-2 に示す通りの曲面形状を有している。よって、接合プロセスの曲面形状化が課題である。本事業では、主に平板への接合プロセスを確認しているため、平面から曲面に接合プロセスを拡張に取り組む。具体的には、曲面形状に応じた樹脂シートの加圧手法、接合界面のレーザーによる温度制御手法を確認する

(2-2) 炭素膜による低付着表面改質

実翼の翼面は図Ⅱ-2 に示すように曲面形状を有しており、この翼面全体が成膜対象となる。よって、翼面全体における均一な炭素膜の成膜手法の確認が課題である。本事業では、平面、小片における炭素膜の成膜評価を行っていたため、平面から曲面へ成膜プロセスを拡張する。具体的には、曲面形状においても均一厚さで成膜が出来るよう翼を成膜中に回転できる成膜治具構造の検討を行う。また、炭素膜は薄く耐久性における課題が懸念されるため、炭素膜と硬質膜の複合による高耐久化膜構成の解明に取り組む。

(2-3) 粒子法による水滴挙動計算

本事業では、翼 1 段分を想定して計算モデルの構築および実験による水滴量の実測を実施した。図Ⅲ-10 に示す通り実際のタービンでは複数段において、ドレンキャッチャーによる水滴捕集を行っており、タービン全体での水滴捕集効果を検討することが求められる。よって、タービン全体の水滴捕集効率の見える化が課題となる。そこで、タービンサイズの大規模モデル化への規模拡張により水滴捕集効率の見える化し、タービン全体における水滴捕集効率を検証する。また、本事業における計算モデル、実験は主に遠心力効果を主な対象といたため、蒸気流の効果との複合化により精度向上にも取り組む。また、本成果における水滴捕集量を実現した際に得られる腐食抑制効果について、腐食試験による寿命検証を併せて実施する。

個別テーマ (2.4)

(2) 地熱エネルギーの高度利用化に係る技術開発

(2.4) 酸性熱水利用のための化学処理システム開発

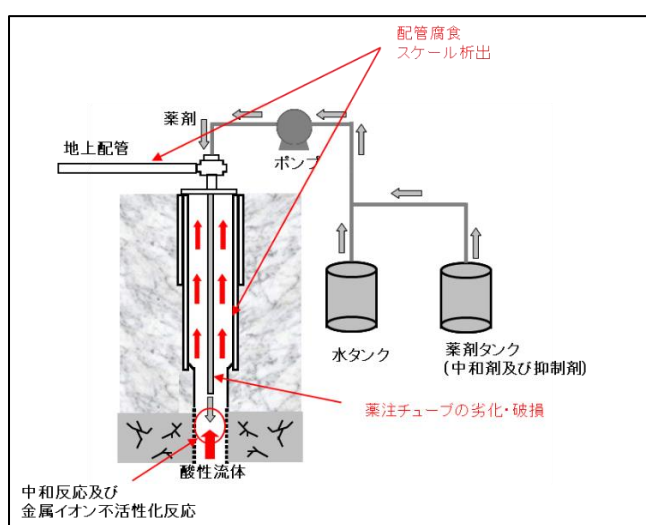
委託先：西日本技術開発株式会社、国立大学法人九州大学、
国立大学法人富山大学

II. 研究開発マネジメントについて（事業の計画内容）

(2.4.1) 背景と目的

地熱発電所では、掘削した生産井から酸性熱水が噴出する場合や生産を続けるうちに熱水が中性から酸性に変化する場合がある。その際には、生産井や地上設備、還元井の配管に腐食が生じると共に、中性熱水と混合した場合にはスケールが配管やセパレータ、還元井内に多量に生成するなどのトラブルが生じている。このため、現状では酸性井は未利用であるか、利用できても定期的な配管の交換やスケール洗浄を行っており、地熱発電所を運営する上での課題となっている。

海外では酸性井坑内に中和剤を注入して腐食を抑制する先行事例もあるが、薬注管が腐食や劣化により破損するとともに、中和処理によりスケールが生成するトラブルが報告されている（図Ⅱ-1）。本研究は、酸性熱水による配管腐食やスケール析出を防止する化学処理技術や配管被覆技術を中心に開発を行い、未利用酸性熱水の有効活用を図るものである。このため、海外などの先行事例を参考にして、生産井から地上配管、還元井まで考慮した酸性熱水利用に適した効率的で経済性の高い最適な化学処理システムを構築する。



(Akazawa & Itoi, 2009 に加筆)

図Ⅱ-1 中和システムの概要

(2.4.2) 実施内容

本研究では、中和剤や腐食抑制剤を生産井坑内に注入することで酸性熱水を利用可能にすることを目的として、以下の項目を実施した（図Ⅱ-2）。

(1) 酸性熱水の化学処理技術開発

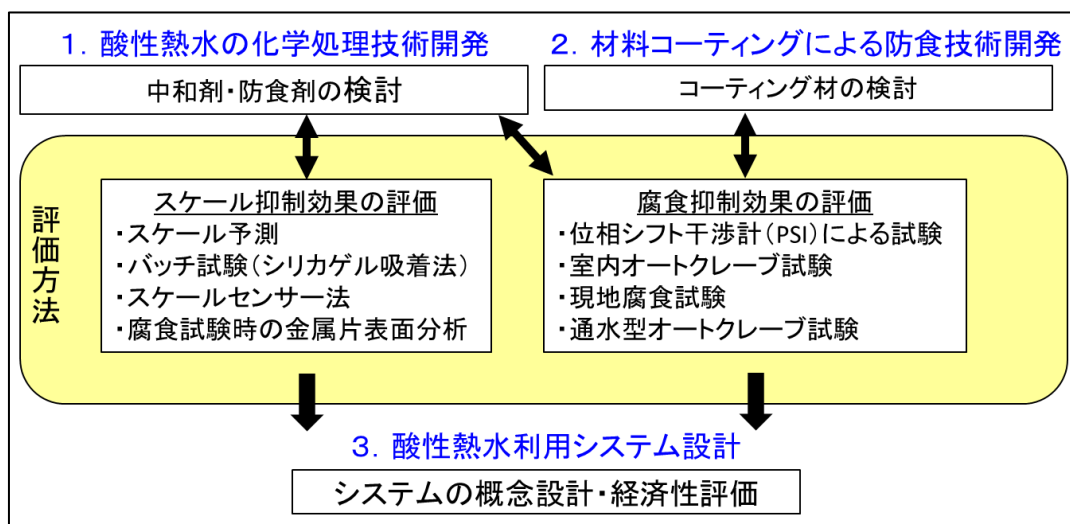
酸性熱水の中和に適切なアルカリ溶液や防食剤を、腐食抑制とスケール生成抑制の両面から評価した。タイプの異なる複数の地熱発電所の熱水を用いて、室内および現地での試験を実施し、複数の熱水や試験条件において薬剤の有効性を評価した。その結果から、モデルフィールドに適した薬剤やその添加条件を選定した。

(2) 材料コーティングによる防食技術開発

本テーマでは、金属表面にシリカスケールあるいは耐食性のある物質を被覆して防食する技術の適用性を評価した。スケールや耐食性のある物質で被覆した金属片を作成し、上記と同様の試験で腐食抑制効果を評価した。

(3) 酸性熱水利用システム設計

文献・事例調査や上記の結果に基づき、モデルフィールドを想定して安定した酸性熱水利用や低コスト化を考慮した中和や腐食抑制剤添加システムの概念設計を行った。それに基づき、システムの設置コストや運転コストの積算を行った。



図Ⅱ-2 事業概要

(2.4.3)実施期間と工程

本研究の実施工程は、表Ⅱ-1に示すとおりである。

実施期間：2018年7月3日～2021年5月31日

表Ⅱ-1 実施工程

実施項目	2018年度	2019年度	2020年度	2021
1. 酸性熱水の化学処理技術開発				
1-1 注入薬剤・注入管材料の評価・選定		腐食試験 現地試験		
1-2 酸性熱水から析出するスケール成分予測・防止方法の検討		予測 現地試験		
2. 材料コーティングによる防食技術開発		コーティング材の準備	1-1にて評価	
3. 酸性熱水利用システム設計				
3-1 システムの概念設計		モデルフィールドでの設計		
3-2 経済性評価				
4. 技術推進委員会の開催	▼	▼ ▼	▼	▼

(2.4.4) 開発目標と達成状況

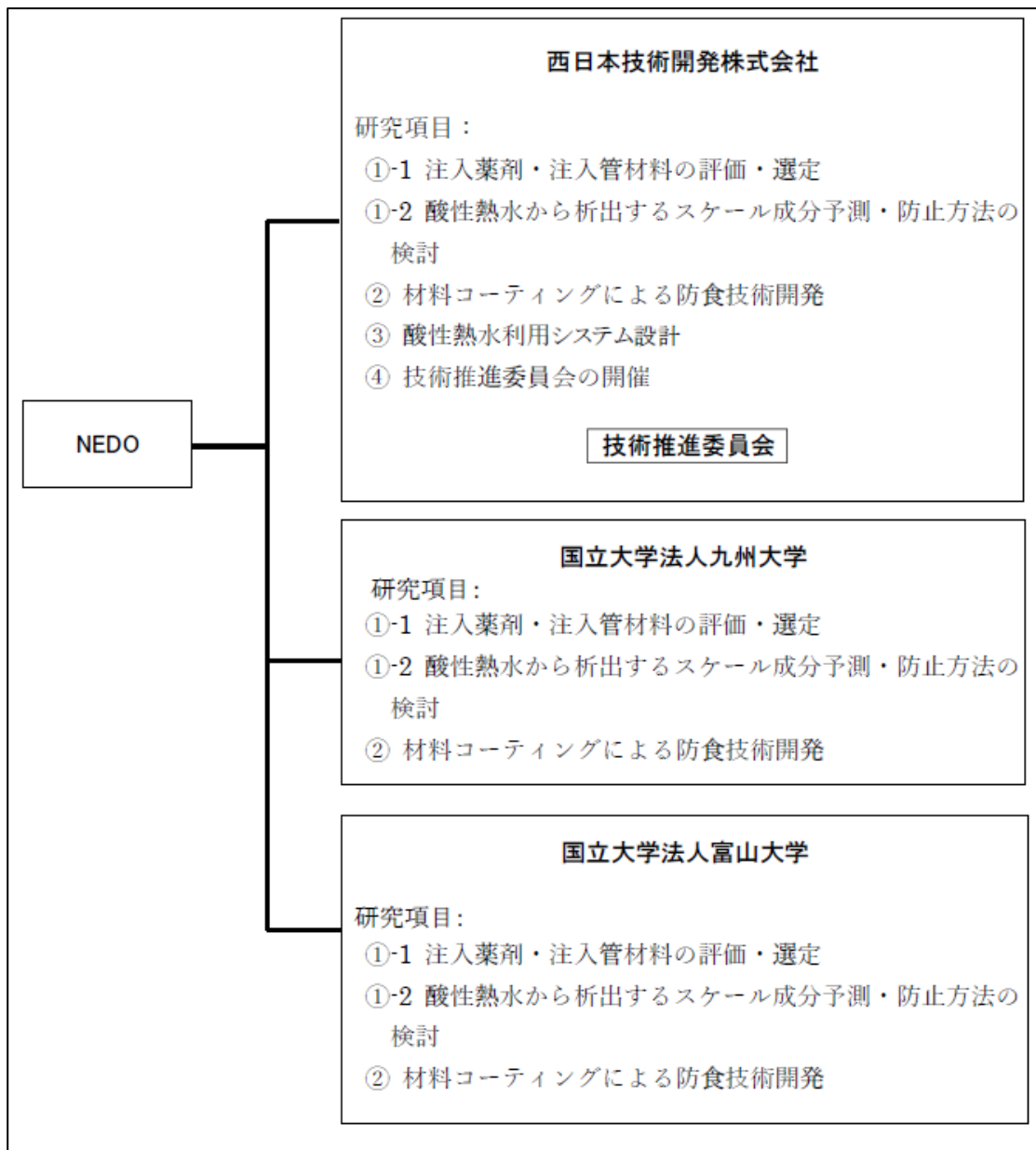
本研究の開発目標と達成状況は、表Ⅱ-2のとおりである。

表Ⅱ-2 開発目標と達成状況

事業項目	開発目標	達成状況
1. 酸性熱水の化学処理技術開発	薬剤注入管、地上配管の腐食を抑制すると共に、薬剤添加後にスケールが生成しない条件を提案する。	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 腐食抑制剤や中和に関する試験を行った結果、八丁原で腐食とスケール生成を共に抑制する条件として pH=4~5 を選定。 ▶ 中和後のスケール生成を抑制するには、鉄イオンの反応抑制や pH のコントロールが有効。 ▶ 熱水の化学組成によっても異なるが、鉄イオンの反応抑制には EDTA・4Na 等、中和処理後に中性熱水と混合する場合には緩衝作用のある EDTA・4Na、酢酸 Na、シュウ酸 Na、中和地点近傍の局所的な pH 上昇によるスケールを抑制するにはシュウ酸 Na や酢酸 Na の添加が有効。
2. 材料コーティングによる防食技術開発	薬注管の内外において、腐食が抑制できる条件（配管材質、調整後の熱水 pH 等）を提案する。	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 溶射（Ni4 種合金, Ti, 50Ni50Cr）やシリカスケール、ナノバブルによるコーティング効果を確認する耐食試験の結果より、酸性熱水および NaOH 溶液への耐食効果が共に高い材質は、SUS304、Alloy825 に次いで溶射材（Ni4 種合金）であった。 ▶ Ni4 種合金溶射は、酸性熱水中でもシリカのコーティング効果が得られ、耐食効果が持続することが期待できる。
3. 酸性熱水利用システム設計	年間のシステム稼働率が 80% 以上で、かつ、経済性のある（導入費用やランニング費用の総コストより発電電力量アップによる売上げが上廻る）システム設計を提案する。	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 中和処理を行うことにより酸性井の稼働率を過去 2 年の平均（定修を除く）87%から 96%に上げられる見込み。 ▶ モデルフィールドの酸性熱水対策としては NaOH に一部 EDTA・4Na を添加した中和処理が有効である。 ▶ そのための設備の概念設計を行った結果、10 年以内に設備費の回収が見込める。

(2.4.5)実施体制

本研究の実施体制は、図Ⅱ-3のとおりである。



図Ⅱ-3 実施体制

技術推進委員会委員

倉田 良明：元産業技術総合研究所東北センター 主任研究員

竹中 照雄：出光興産株式会社 資源部 地熱事業室 チーフエンジニア

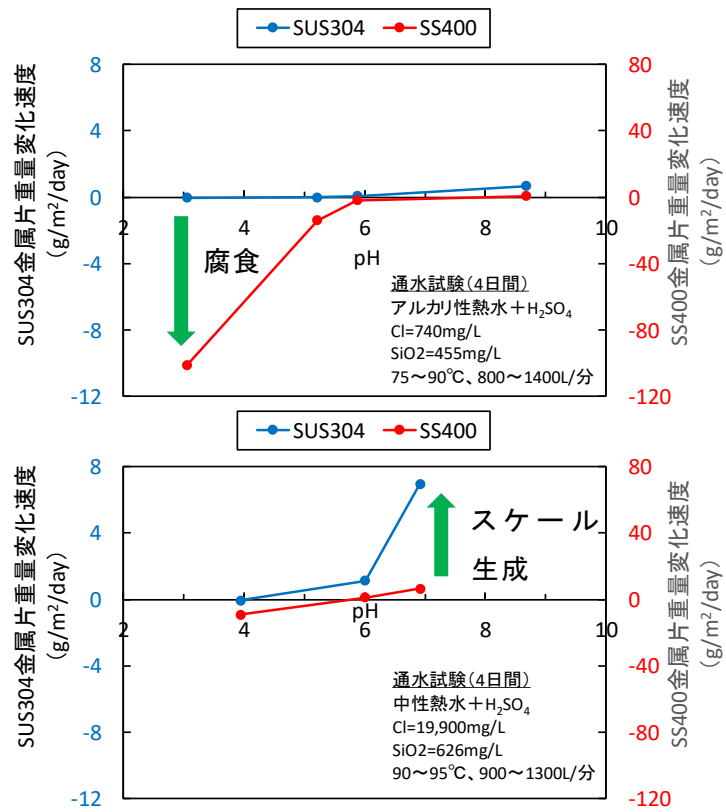
松尾 哲也：九州電力株式会社 エネルギーサービス事業統括本部 火力発電本部
地熱運営グループ長

Ⅲ. 研究開発成果について

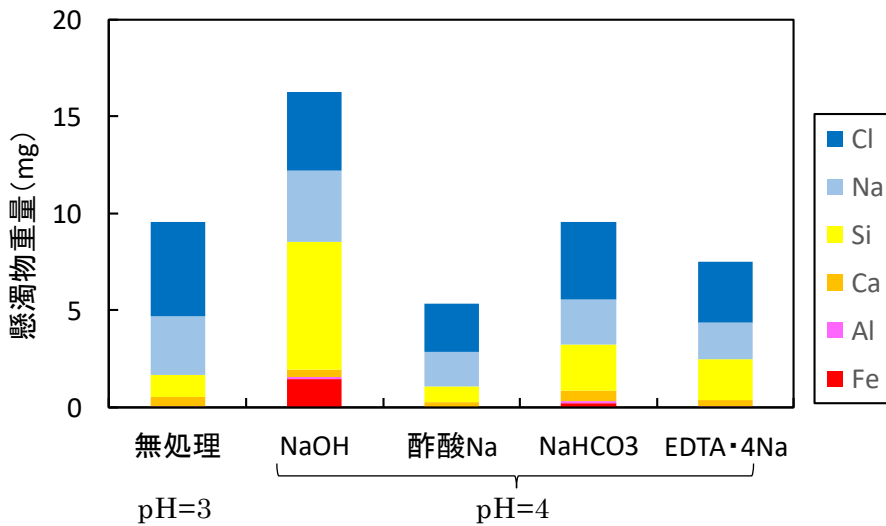
地熱発電所で酸性井を利用する方法の一つとして、化学的処理に関する検討を行った。主な成果は以下のとおりである。

- ① 既存資料調査の結果、生産井坑内で中和処理を行う際の課題は、pH 上昇に伴うスケール生成や薬注管の破損、坑内トラブル、高コストなどであった。また、ほぼ同じ条件で試験していてもその効果やスケール生成状況には地域による差が生じており、それぞれの熱水の化学組成に応じて最適な条件を選定する必要があることが示された。
- ② 複数の地熱熱水で腐食試験を行った結果、いずれも $\text{pH} < 4$ で腐食が顕著であり、 $\text{pH} > 6$ でスケールの生成が顕著となった（図Ⅲ-1）。予測計算でも同様の結果が得られた。特に、塩濃度が非常に高い場合や鉄濃度が高い場合は、他の熱水に比べてスケールが生成しやすく、pH のわずかな上昇で急速にスケールトラブルを招く恐れがある。
- ③ 中和に伴うスケールトラブルを回避するためには、鉄イオンの反応性を抑制することや局所的な pH の上昇を抑制することが重要である。これまでの事例では酸性熱水の中和剤としては NaOH 溶液が使用されることが多いが、スケールトラブルを回避するには、NaOH 溶液の濃度を下げることやキレート剤、pH 緩衝作用のある薬剤の使用が有効であり（図Ⅲ-2）、それぞれの熱水の化学組成や中性熱水との混合の有無などに応じて、適した薬剤を選定する必要がある。
- ④ 本手法をフィールドに適用するには、薬剤を添加した際のスケール生成状況の違いを短期間で評価する必要があるため、スケールセンサーや金属片の表面分析を利用したスケール評価手法の確立を行った。
- ⑤ 金属表面への溶射（Ni4 種合金，Ti，50Ni50Cr）やシリカスケール，ナノバブルによるコーティング効果を確認する耐食試験の結果では、酸性熱水および NaOH 溶液への耐食効果が共に高いのは、SUS304、Alloy825 に次いで溶射材（Ni4 種合金）であった。高温下で Ni4 種合金を溶射した金属片を酸性熱水に浸漬した試験では、他の金属片に比べて金属表面がシリカで覆われていたことから、酸性熱水中でもシリカのコーティング効果が得られ、耐食効果が持続することが期待される。
- ⑥ モデルフィールドの酸性熱水対策としては、NaOH 溶液に一部 EDTA・4Na を添加して $\text{pH}=4\sim 5$ に調整する中和処理が有効と考えられる。その場合の設備の概念設計およびコスト試算を行ったところ、10 年以内に設備費の回収が見込める結果が得られた。

また、本研究で得られた成果は、これまでに学会や雑誌にて発表した（表Ⅲ-1）。



図Ⅲ-1 熱水の pH による腐食・スケール生成状況の変化



図Ⅲ-2 酸性熱水を各薬剤で中和処理した後のスケールの重量と化学組成

表Ⅲ-1 特許、論文、学会発表など

	特許	論文	学会発表・講演	新聞等への掲載
2018年度	0件	0件	0件	1件
2019年度	0件	0件	10件	0件
2020年度	0件	4件	2件	0件
2021年度	0件	0件	5件	0件

IV. 事業化へ向けての見通しと取組みについて

1. 中和処理システム

本研究では、1 か月間の実証試験を予定していたが、酸性熱水を噴出する生産井の停止により実施不可能となった。今後、実証試験可能な生産井が確保できた後に、改めて実用化試験を行い、薬剤注入管の耐久性などを確認する。また、今回は鉄の反応性を抑制する薬剤として EDTA・4Na を選定したが、今後、他の薬剤についても検討を進め、より経済性の良いシステムへの改良を行う。その後は、本技術を用いて実際の生産井運用への適用を実施できると考えている。本研究においても複数の地熱流体を対象として基礎試験を実施したが、事業化フェーズでは更に多様な熱水性状の地熱地域に適した薬剤の選定を行い、更なる技術改良と導入拡大に努める。

2. 評価手法

上記の中和処理システムを他の地熱発電所に適用する際には、その地域の熱水を用いて最適な薬剤や添加条件を選定する必要がある。その際には、本研究で九州大学や富山大学が開発した薬剤添加による腐食やスケール生成の抑制効果を速やかに評価する以下の手法が活用できる。

- ・ 酸性熱水による金属腐食防止を評価する手法として、フロー式オートクレーブを用いた現地評価方法を確立した。この装置を用いることにより、高温高圧下でアルカリ添加や腐食抑制剤添加による腐食抑制効果の評価が可能となり、他地域で類似の評価を行う際に有用である。
- ・ 地熱流体から沈殿するスケールの種類や沈殿速度を短時間（数時間～半日）で評価できるスケールセンサーの開発を行った。このセンサーは、装置の小型化やポータブル化を行い、かつ誰にでも利用できるように改良中であり、様々な地熱地域へ今後の適用が期待される。
- ・ 酸性熱水の中和処理や、中性熱水との混合による熱水化学組成の変化やスケール生成の可能性を、シミュレーションを用いて予測することができた。特に、酸性熱水

のアルカリ中和で、どの pH に調整するかを、Fe 濃度変化を軸に予測することができているため、本手法を用いれば、他地域での酸性流体の処理方法を検討する際の貴重な手法となる。

- 酸性熱水を含む幅広い熱水からのスケール生成の初期の元素挙動を評価可能な手法（テストピース浸漬法とその表面の元素分析法（SEM-EDX と LA-ICP-MS の組み合わせ））の基礎を確立したが、これをさらに発展させたスケールモデリング技術とすべく、引き続き 2021 年度の NEDO 地熱発電導入拡大研究開発/地熱発電高度利用化技術開発にて取り組み、AI の利活用も含めて実用化への歩みを進める。
- 酸性熱水のアルカリ中和時のシリカスケール形成に関与する元素挙動（ケイ素・鉄など）やアルカリとスケール生成因子抑制剤を同時に加えた場合の中和による元素挙動の解明にも目途がついたところである。本手法だけでも適用可能な酸性流体が多くある（実用化）と思われるが、今後、直接的にシリカスケールの生成を抑制するインヒビターについても検討を進めたい。

以上

個別テーマ (2.5)

(2) 地熱エネルギーの高度利用化に係る技術開発

(2.5) 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

委託先：地熱技術開発株式会社，西日本技術開発株式会社，
三菱パワー株式会社，
学校法人早稲田大学

II. 研究開発マネジメントについて（事業の計画内容）

(2.5.1) 背景と目的

2015年7月に、経済産業省がエネルギー基本計画の方針に基づき決定した「長期エネルギー需給見通し」において、地熱発電は、2030年度の電力の需給構造の電源構成における総発電電力量10,650億kWhのうち、1.0～1.1%程度（設備容量140～155万kW相当）が見込まれている。

このため、2030年度の目標達成に向けて、地熱発電への取り組みを加速化する必要があるが、設備容量と同時に発電電力量の目標を達成するためには、発電所の設備利用率を既設（約50万kW）と新設（約100万kW）を合わせて平均83%程度まで向上させる必要がある。しかしながら、現状の老朽化が進んだ既設発電所の設備利用率は54%に過ぎない。

設備利用率の向上には、地下資源量の安定的な維持とともに、発電プラントの設備不具合を予兆して早期に異常を検知することで、未然に発電プラントの停止事故を予防することや、日々変化する生産井の生産状況に応じた坑口弁の制御による最適な合流条件の決定などが求められる。

現在は、運転員の経験に基づき実施しているこのような地熱発電所の運転管理に対するIoT-AI技術の適用研究を実施し、IoT-AI技術による操業アシストシステムが構築されれば、経験の短い技術者のアシストができ、発電所トラブルの回避やトラブルの早期解決が期待できる。このことにより、地熱発電所の設備利用率の向上に寄与することができる。

地熱発電所の設備利用率の向上を目指すIoT-AI技術を開発するにあたり、通常の火力発電所で適用されている技術の転用が考えられるが、地熱発電所は地下資源を井戸～配管を介してつながっており、地下資源の蒸気供給系における不確実性が地熱発電プラント全体に及ぼす影響が大きい。

このことから、通常の火力発電所のIoT-AI技術とは別種の難しさがあると考えられる。例えば、地熱発電プラントのO&M上の管理の難しさとして以下の点が挙げられる。

- ① 離隔地が多く、メーカーの迅速な対応が難しい
- ② 地熱特有の問題（腐食・スケール・地下の変化等）に伴う多岐にわたる専門的な知識・経験が必要だが、事業者、メーカー、コンサルタントを問わず経験豊富な技術者が不足気味
- ③ 専門的な技術者の動員に伴うメンテナンスコストの上昇
- ④ 異常発見の遅れによる被害拡大
- ⑤ 坑口特性条件の異なる各生産井の合流のバランスには、現場に経験者が必要であるが、実際に最適操業条件による操業ができていないか不明確である

このような課題を解決し、地熱発電所の利用率最大化を図るには、IoT-AI 技術による「異常の早期発見と故障予防」および「最適操業条件の決定」が必要となる。

具体的に地熱発電所の利用率最大化を図るには、最適な O&M を行うことが重要である。

一般的に発電所では、各種運転データの管理、および運転員のパトロール等で各機器・系統の不具合を発見し、対応する仕組みが構築されている。しかしながら、複数の運転データを関連付けて設備の不具合を発見したり、系統の性能低下を的確に管理することは難しく、機器トラブルによる計画外停止、および性能が低下したままでの運転継続が行われ、結果として利用率が低下する場合もある。また、貯留層の状況を把握しながら最適な蒸気採取を行うことも難しいことは、地熱関係者であれば容易に理解されている。

これらは、有機的に関係している複数のデータを処理するのに、人間では限界があることによるもので、O&M を体系化してトラブルや性能低下を予見、または対応するシステムの構築が望まれるところである。

地熱発電所で O&M を体系化するには、発電設備と蒸気・熱水輸送整備に区別して考える必要があり、発電所の利用率向上には、それぞれの視点で、管理手法を整理し最適な O&M を行うことが重要である。

さらに、発電設備は2つの視点での整理が必要で、各機器・系統の不具合の早期発見により、計画外の発電所の補修停止回数・期間を最小化するシステム、および（蒸気、水、ガス、空気等の）系としての性能が設計どおり維持されているかを常に監視するシステムが必要である。

上述の整理の基、蓄積された模擬の運転データをベースに O&M の最適化を図る AI を活用したシステムを構築する。

具体的には以下の3つの観点で開発を進める。

- ① 地熱発電システムの O&M 最適化
- ② エネルギー回収量の最適化
- ③ M2M センサー開発

このうち②項（エネルギー回収量の最適化）について、(1) 坑井操作情報をもと

に坑井特性を機械学習（オンライン）、（2）学習した坑井特性をもとに貯留層モデルへフィードバック（オフライン）という枠組みの可能性検討を行うこととしているが、本枠組みが有効に機能することが確認された場合、将来的に（3）精緻化された貯留層モデルを組み込んだ貯留層長期運用の観点も含めた、エネルギー回収量の最適化へつながることが期待される。

なお、要素研究は先進的なアイデアに基づく機械学習システムがメインであり、既存のフィールドデータでは検証に十分なデータが確保できるとは限らないため、本事業ではシミュレータにより生成した模擬データをもとに検証を行う。

本研究の最大の目的とする地熱発電所の利用率最大化の概念図を以下に示した。

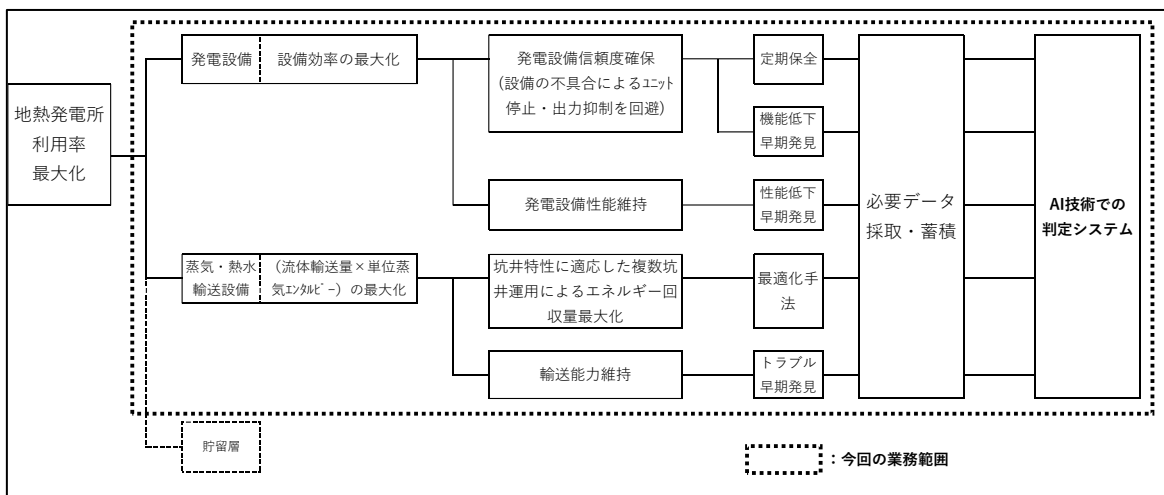


図 II-1 地熱発電所の利用率最大化の概念図

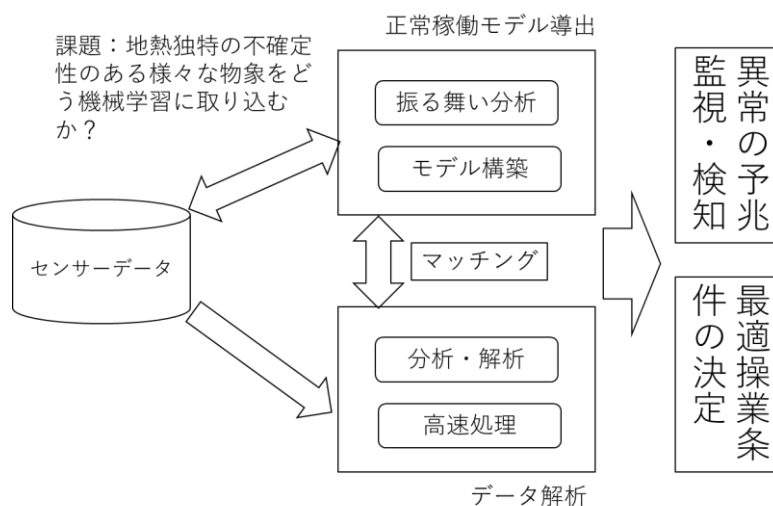
ここでは、発電設備と蒸気・熱水輸送設備・貯留層に区分し、今回は地下の問題である貯留層については取り扱わないこととする。発電設備では、故障予兆や性能維持による「設備効率の最大化」を目標とする。また、蒸気・熱水輸送設備では、生産井—二相流配管—セパレーター—蒸気配管—タービン入口までを含む生産設備ネットワーク全体のバランスを考慮して、「エネルギー回収量（流体輸送量×単位蒸気エンタルピー）の最大化」を行うシステムの構築を目標とする。

電設備については、発電設備信頼度確保（設備の不具合によるユニット停止・出力抑制の回避）と発電設備性能維持がキーとなる。発電設備信頼確保においては、機能低下早期発見の課題について検討する。また、発電設備性能維持については性能低下早期発見の課題について検討する。これらの課題を解決するための、IoT に結び付ける計測手法や計測データと予兆現象を関連付けて、機械学習（AI）に引き渡すことが重要なテーマとなる。

一方、蒸気・熱水輸送設備については、日々刻々と変化するそれぞれの坑井特性に

適応した複数坑井運用によるエネルギー回収量（流体輸送量×単位蒸気エンタルピー）の最大化と、輸送能力維持がキーになる。このため、坑井特性に適応した複数坑井運用によるエネルギー回収量の最大化を行うために、生産井と配管のネットワークを模擬するシミュレータなどを活用した最適化手法の開発が重要となる。ただし、エネルギー回収量を最大化した場合に地熱貯留層に与えるリスク（長期的な蒸気生産量の減衰など）も考慮することが必要である。

地熱発電所は、坑井設備・蒸気設備・発電設備・送電設備に大別される。ほとんどの発電所では、既にDCSを活用した計装設備で日常の操業を管理しているが、それに加えて、故障予兆監視において必要なデータを追加するセンサーネットワークによるビッグデータの収集システムを構築する必要がある。また、機械学習（AI）は、センサーネットワークが収集したビッグデータに基づき、故障予兆監視・検知（故障予兆を監視・検知して、事前に警報を発する）を行うとともに、生産井の変動に応じた発電所の最適操業条件を割り出し、それに基づき、坑井設備や蒸気設備の制御を行う。



図Ⅱ-2 機械学習（AI）の概念

制御の方法は、蒸気生産設備の各所に取り付けられたバルブ（弁）の開閉によってしか実現できないため、系全体でバランスの取れたバルブの制御を行うことで、利用率の最大化を行えるかが技術的な課題となる。

開発は 5 つの要素技術と、それを統合してシステムに実装する全体システム設計の 6 つの項目に分けて行う。

- ① 全体システム設計
- ② 蒸気・熱水輸送設備（坑井、蒸気・熱水輸送設備等）の O&M の最適化
- ③ 地熱発電設備（タービン・発電機、復水器、冷却塔等）の O&M の最適化
- ④ 蒸気生産ネットワークシミュレータの開発

⑤ 地熱特有の M2M センサー技術の開発

⑥ AI 技術を活用した地熱発電設備 O&M の最適化

①の全体システム開発では、実際の地熱発電所で具体的に適用するために必要なシステム統合化における②～⑥の要素技術間のインターフェース基準構築の標準化などの作業を行う。また、要素技術間の調整も併せて行う。

既存の発電所で収集しているデータだけでは、坑井や貯留層での変動が発電所の全体の系に及ぼす影響まで含めて、機械学習で意味のある判断を行うことは、現状では困難であると考えられる。したがって、開発した技術の検証を行う場合、理想的には発電所の一部分を用いて必要十分なセンサーを取り付けて、検証のために系全体に大きな影響を及ぼすような変化について、弁を調整する必要があると考えられる。しかしながら、日々操業を続けている発電所で、系全体に大きな影響を与えることは困難である。

そこで、人間の操作を想定した模擬操業データによる検証に基づき、必要とされるセンサーでの挙動について、一定のルールを仮定して外挿した模擬データを利用して、作成した既存データと外挿データを組み合わせた一連の発電所操業に係る半模擬データを用いて検証を行うかどうか、総合的に判断する。そして、最終的なシステムの動作検証方法を決定して、検証を実施する。

(2.5.2) 研究開発の概要

本事業の事業項目ごとの研究開発目標と根拠を表1に示した。

表 II-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 全体システム設計	<ul style="list-style-type: none"> ➤ トラブル発生率抑制 20% ➤ 利用率向上 10% 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 生産井の系統除外現象を24時間前に予測できれば、坑口条件を変化させることで対応が可能 ➤ 地熱発電所の平均利用率が57%まで低下しているため、これを67%（約7割）まで回復させる。
②・③ 蒸気・熱水輸送設備、地熱発電設備の O&M の最適化	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 利用率低下を招いている発電所の現象がどのようなメカニズムで発生するかについて周辺坑井を含む操業データ等から解明する。 ➤ タービンノズル閉塞などの問題に対して発電設備側の定検頻度の合理化を図る 	<ul style="list-style-type: none"> ➤ 年間を通じて数10回発生している生産井の系統除外現象（年間の損失発電量6%程度）を分析することで利用率向上の方策を策定する。 ➤ 発電設備モデルを構築して、発電サイクルシミュレーションを行い、定検期間の頻度とコストの関係を試算して検討する。 ➤

④ 蒸気生産ネットワークシミュレータの開発	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 坑井の坑口条件を変化させた場合のタービン入口での蒸気条件を計算する。 ▶ 生産井の系統除外現象に対する坑内での流動メカニズムを解明する。 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 定常坑井シミュレータと発電サイクルシミュレータの組み合わせで計算可能 ▶ 非定常坑井シミュレータを用いることで流動メカニズムの解明が可能
⑤ 地熱特有のM2Mセンサー	<ul style="list-style-type: none"> ▶ トラブル発生率抑制・利用率向上に寄与するセンサー技術(二相流量計・弁開度等)を選定して、現状での適用性を明らかにする。 ▶ 圧力・温度など既存のセンサーについて、IoT化に必要な周辺技術(通信等)をまとめる。 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 集合気水分離方式の場合、個々の生産井の二相流量が把握できていない。 ▶ 弁開度操作をIoT側で認識できる技術が導入されていない。 ▶ 旧来の圧力・温度などの情報を如何にIoT化するかは課題である。
⑥ AI技術を活用した地熱発電設備O&Mの最適化	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 大幅な利用率低下を招いている生産井の系統除外問題について、現象発生12時間前程度に警告が得られて運転員が対応可能なシステムを開発する。 ▶ ドローンや新しいセンサー技術(振動計)などの情報からO&Mに有用な情報を入手する技術を開発する。 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 12時間前に警報が得られれば、運転員が坑口2次弁操作などの対応を行う十分な時間が得られる。 ▶ 積雪地帯など、冬期のパトロールが不可能な配管等の無人監視により、発見困難な故障を発見できる。 ▶ 二相流量計などの技術的に導入が困難な技術の代用品として、振動現象などの代替観測機能を検討する。

(2.5.3) 事業スケジュール

本事業の研究期間は、2018年7月3日より2021年2月28日であり、主な事業スケジュールの概要を図Ⅱ-2に示す。

事業項目	2018年度				2019年度				2020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 全体システム設計		動作検証方法の設計 クラフトサーバー設定			基本モデル作成・動作検証準備 クラフトサーバー設定運用				プロトタイプシステム構築 異常予兆検知 半模擬データによる動作検証			
② 蒸気・熱水輸送設備 (坑井, 蒸気・熱水輸送設備等)のO&Mの最適化		ヒアリング調査 不具合把握方法体系化			坑口弁操作要領の概念設計				改良			
③ 地熱発電設備(タービン・発電機, 復水器, 冷却塔等)のO&Mの最適化		ヒアリング調査 不具合把握方法体系化			トラブル・性能低下評価方法の概念設計 地熱発電設備一連の系での評価システム構築				改良			
④ 蒸気生産ネットワークシミュレータの開発		坑内二相流動シミュレータの基本設計 開発・蒸気生産ネットワークシミュレータの基本設計			坑内二相流動シミュレータの開発 蒸気生産ネットワークシミュレータの試作				坑内二相流動シミュレータの改良・開発 蒸気生産ネットワークシミュレータの開発			
⑤ 地熱特有のM2Mセンサー技術の開発		ヒアリング調査 地熱環境用センサー技術整理			・M2Mセンサー技術の整備				・M2Mセンサー技術の試作・地熱環境試験・実用検証システム構築仕様・開発指針			
⑥ AI技術を活用した地熱発電設備O&Mの最適化		ヒアリング調査 蒸気・熱水系合流蒸気制御系推定システム概念設計			体系化した内容の各種AIツールによる効果検証 ・発電所半模擬データによる最適運用方策推定システムの検証と改良				AI技術を用いた異常診断システムの評価 AIによるO&Mの最適運用方策の総合評価			
⑦ 検討委員会の開催		▲		▲	▲		▲		▲		▲	▲

図 II-2 研究開発のスケジュール

(2.5.4) 研究開発の実施体制

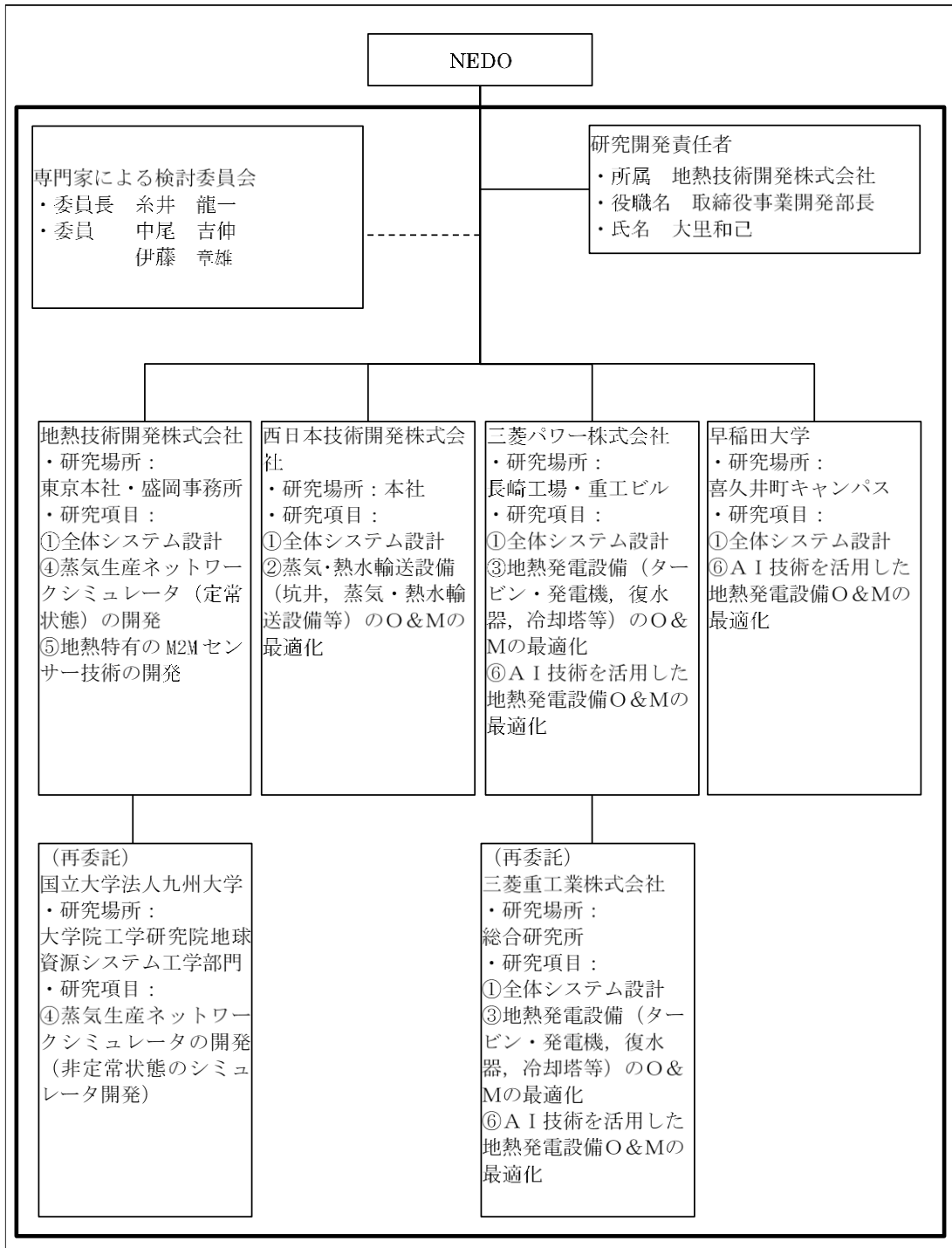


図 II-3 研究開発の実施体制

(2.5.5) 事業の管理運営

表Ⅱ-2 未利用地熱エネルギーの活用に向けた技術開発 検討委員会

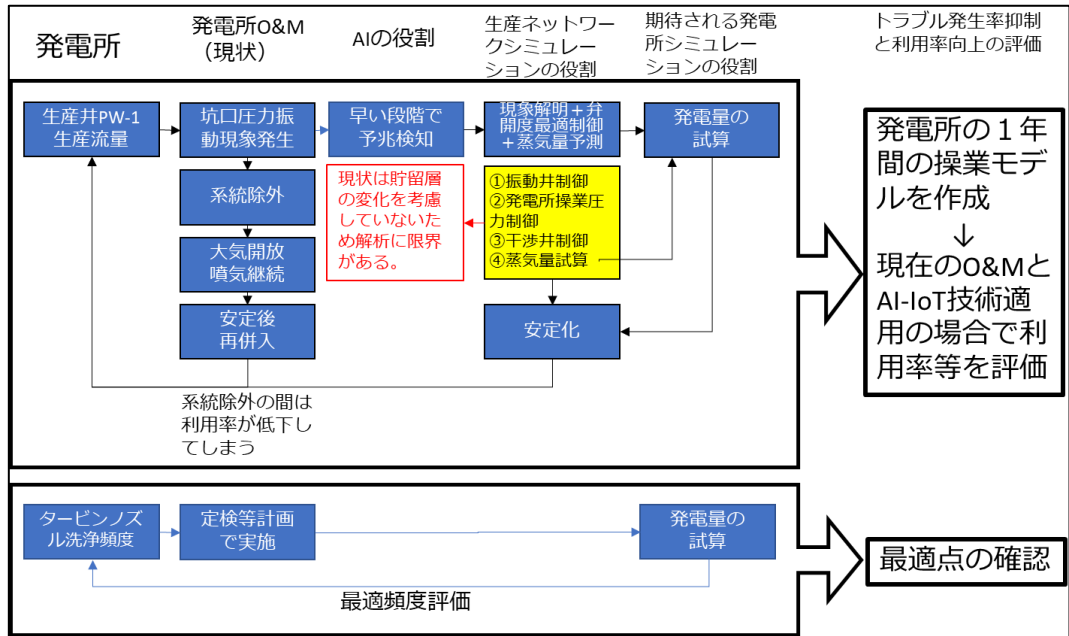
担当	氏名 (敬称略)	所属
委員長	糸井 龍一	九州大学名誉教授
委員	中尾 吉伸	一般財団法人電力中央研究所エネルギー技術研究所エネルギープラットフォーム創生領域 上席研究員
委員	伊藤 章雄	横河電機株式会社人財総務本部 キャリア開発センター

Ⅲ. 研究開発成果について

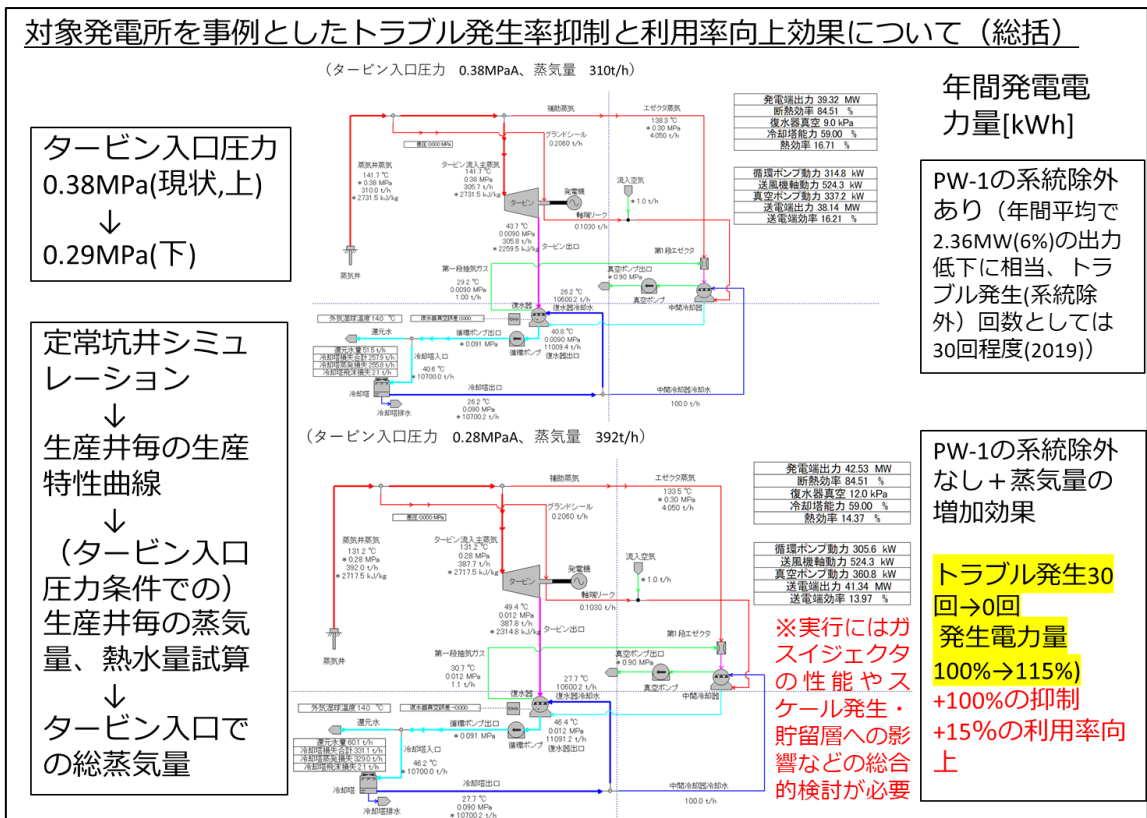
実際の発電所のヒアリング調査に基づき、地熱発電所の坑井（流体流入点～坑内～坑口）～蒸気設備・還元設備～発電設備において、最適操業条件決定システムと「故障予兆監視・検知システム」による操業アシストシステムを構築して、経験の短い技術者のアシスト、発電所トラブルの回避や性能低下の早期発見によって、地熱プラントの稼働率と設備利用率の向上に寄与するため、以下の研究開発を実施した。

① 全体システム設計

アンケート・ヒアリング調査によって、利用率向上の必要性のある地熱発電所（以下、対象地熱発電所）を選定した。対象地熱発電所で発生している利用率に大きな影響を与える問題について、②～⑥の要素技術を適用した。その結果、対象地熱発電所をベースとした模擬モデルにおいて、実際に生じている生産井の不安定化と系統除外問題をモデル化して（図Ⅲ-1）、トラブル発生率抑制100%（30回/年→0回/年）、利用率向上15%を得ることができた（図Ⅲ-2）。また、課題として、実際の問題解決には、各坑井の二相流量測定や貯留層変動の解明が不可欠であることが判明した。



図III-1 実証のアプローチ



図III-2 対象発電所に基づき作成した模擬データによる
トラブル発生率抑制と利用率向上効果について

② 蒸気・熱水輸送設備の O&M の最適化

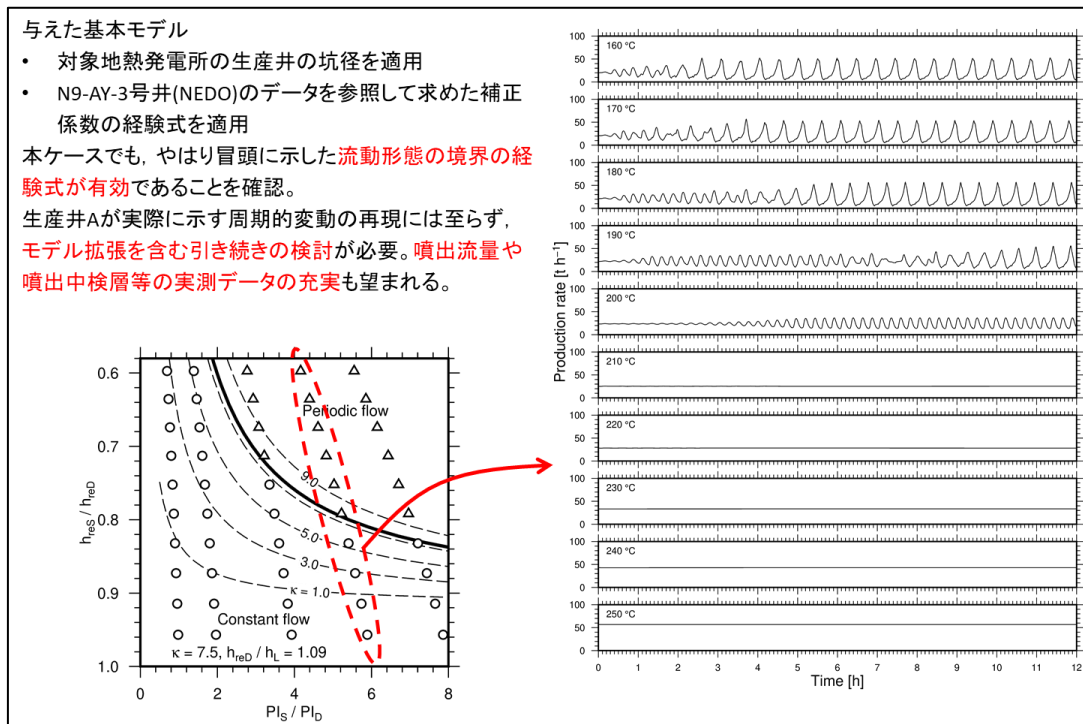
対象地熱発電所について、発生している問題として、特定の生産井において、蒸気生産の周期的変動が発生して、ある時点で坑口圧力が急激に低下して噴気停止に至る現象（以下、系統除外現象）について、周辺生産井・還元井のデータも含めて、発電設備の変化の影響、配管で繋がる他の生産井の圧力干渉の影響、還元井と蒸気井との干渉について分析を行い、系統除外現象において、生産井同士や熱水の還元量との間に相関性の高い関係を抽出して、系統除外現象についての仮説を導出した。また、PDA(Process Data Analysis)手法の導入により、多変量の運転データから各坑井間の影響を確認する手法について評価した。この結果、対象地熱発電所における周辺基地での蒸気生産量を一時的に減少させることで系統除外現象を抑制できる可能性について提示した。PDA 手法については、利用が可能であることが判ったが、今回は特徴的な現象を抽出することはできなかった。今後の課題として、坑井間の影響を解明するためには、地熱貯留層に関連する追加データが必要であることが明らかになった。

③ 地熱発電設備の O&M の最適化

既設の地熱発電所の O&M に関して要因を検討しトラブル発生のメカニズム分析から不具合の把握方法を体系化した。対象地熱発電所のデータに基づき、定検サイクル最適化検討のための発電設備モデルおよびシミュレーション手法を確立して、タービンノズル閉塞問題に対して、定検頻度とコストについての検討を行い、最適値を得られることを確認した。

④ 蒸気生産ネットワークシミュレータの開発

坑内二相流動シミュレータ（定常、非定常）の開発を行い、実際の坑井で発生する系統除外現象の解明を行った。非定常坑井流動シミュレータによる検討によって、系統除外を起こす生産井について、坑口での圧力の周期的変化現象を再現して、2枚のき裂から成る坑井モデルを仮定した場合に、浅部き裂／深部き裂の関係において、両者のエンタルピーの比と生産指数の比の関係によって、安定～周期的変化～停止の現象が説明できることが明らかになった（図Ⅲ-3）。対象地熱発電所の不安定な生産井の O&M の最適化には、貯留層の変動が大きく関わっており、実施計画段階での予想通り、貯留層も含めて解析を行うことが必要であることが明らかになったため、今後の課題とした。蒸気生産ネットワーク全体としては、坑内シミュレータと発電サイクルシミュレータ（Energy-WIN）の併用によって模擬計算が可能である見通しをつけた。



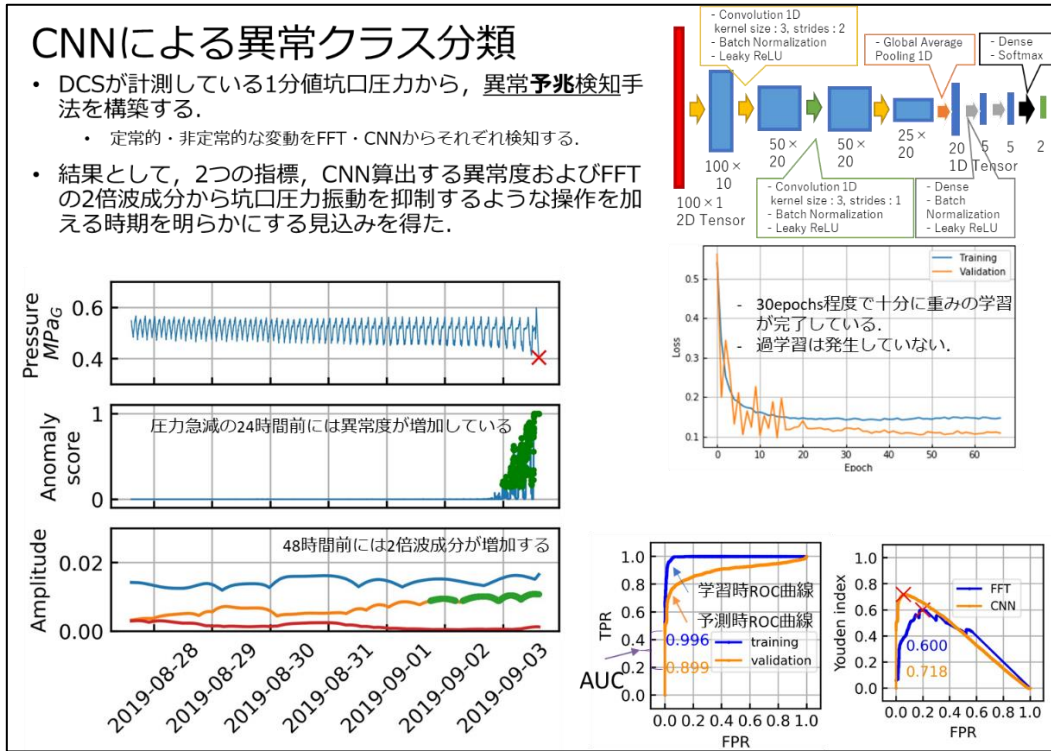
図Ⅲ-3 非定常坑井シミュレーションによる坑口での圧力変動の再現の例

⑤ 地熱特有の M2M センサー技術

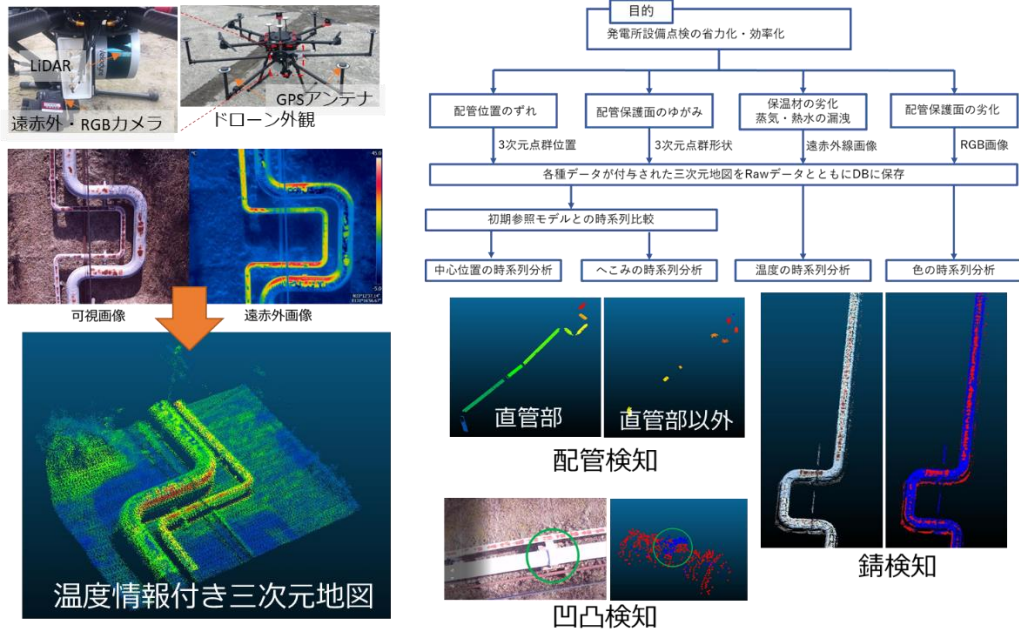
M2M センサー技術の現状調査（メーカーヒアリング）と地熱環境で利用可能なセンサー技術調査を実施して、完全な二相流量測定には未だ技術開発が必要であること、弁開度計測は既存の技術が適用可能であることが判明した。また、二相配管中にガンマ線を透過させて管内の二相流体の密度を計測する技術を用いた室内試験で、気水比 0.3 未満の熱水の多い条件であれば有意な気水比を得ることができ、今後の開発の一つの方向性を示すことができた。また、既存の圧力・温度計に関しては、エッジ・デバイスなどを利用することで IoT 化が可能となることが判った。

⑥ AI 技術を活用した地熱発電設備 O&M の最適化

蒸気・熱水系合流蒸気制御系の推定システムとして、系統除外現象の前に観測された坑口圧力変化について、深層畳み込みニューラルネットワーク（図Ⅲ-2）、FFT 処理による 2 倍波成分の増大、ならびに圧力波形予測（ARDCNN モデル）による系統除外現象の検知手法を開発した。これによって、運転員に替わり、圧力急減という異常の予兆を現象発生前の 12 時間以上前（24 時間前～48 時間前）に事前に検知する見込みを得た。また、ドローンによる配管点検システムを開発して、配管系統異常の自動認識精度は飛行経路制御を改善すれば、さらなる精度向上が見込めることを明らかにした（図Ⅲ-4）。



図Ⅲ-4 生産井の系統除外問題において発生する坑口圧力異常からの予兆検知結果



図Ⅲ-5 ドローンによる地熱設備配管点検システム

表Ⅲ-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
FY2018	0件	0件	0件	0件	0件	0件	0件	0件
FY2019	0件	0件	0件	0件	0件	2件	0件	0件
FY2020	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-2（１） 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 全体システム設計	<p>本システムは、要素技術を繋ぎ合わせて連携させることで全体の系で問題を解決するため、全体システムを統合していく作業は非常に重要である。このことから、実際の地熱発電所で具体的に適用するために必要なシステム統合化における要素技術間のインターフェース基準の構築・標準化作業を行う。また、研究開発項目②以降の要素技術間の調整を行う。</p>	<p>システム統合化の設計およびシステムの動作検証方法の設計(対象地熱発電所のデータに基づく手法検討)を行ったが、AIでの予兆検知は可能であるが、最適手法について、現実の老朽化して貯留層圧力の低下した発電所では生産井の流量圧力制御が困難であり、最適化には貯留層の変動も考慮した生産井の最適制御を行う、あるいは、発電所の運転圧力の制御も含めた最適制御が不可欠であることが判った。</p> <p>対象地熱発電所をベースとした模擬モデルにおいて、S発電所で実際に生じている生産井の不安定化と系統除外問題をモデル化してトラブル、トラブル発生率抑制100%、利用率向上15%を得ることができた。より正確な最適化には各坑井の二相流量測定や貯留層変動の解明が不可欠であることが判明した。</p>	○
②蒸気・熱水輸送設備のO&Mの最適化	<p>蒸気・熱水輸送設備（坑井、蒸気・熱水輸送設備等）のO&Mにおけるトラブル発生のメカニズムを分析し、蒸気・熱水輸送設備の不具合の把握方法を体系化することで、⑥のAIにおける教師データを構築する。</p>	<p>既設の地熱発電所のO&Mの状況に関して要因を検討し蒸気生産量低下の発生のメカニズムを分析して、不具合の把握方法を体系化した。S発電所のデータについて、地上設備の運転データを使った坑井間の関係性を評価し対応案を検討した。地熱発電所のO&Mにおける蒸気生産量低下のメカニズム分析から有効な具具合の把握方法を体系化して、S発電所のデータで坑井間の関係性の評価から対応案を提示した。利用したPDAに関しては未だ十分な結果が得られず、有効性評価は保留する。</p>	○

[最終目標に対する成果と達成度]

表Ⅲ-3（２） 最終目標に対する成果と達成度

③地熱発電設備のO&Mの最適化	地熱発電設備（タービン・発電機、復水器、冷却塔等）におけるO&Mにおけるトラブル発生メカニズムを分析して、地熱発電設備の不具合の把握方法を体系化して、⑥のAIにおける教師データを構築する。	既設の地熱発電所のO&Mに関して要因を検討しトラブル発生メカニズム分析から不具合の把握方法を体系化した。対象地熱発電所のデータに基づき、定検サイクル最適化検討のための発電設備モデルおよびシミュレーション手法を確立して最適値を得られることを確認した。	○
④蒸気生産ネットワークシミュレータの開発	坑内二相流動シミュレータを用いて生産井の坑口生産特性曲線（蒸気流量vs坑口圧力のカーブ）の自動計算を行い、生産井の特性変化に伴う坑口生産特性情報を機械学習側に送り、これにより機械学習側で最適な操業条件（各坑井の最適蒸気生産条件と集合配管での最適合流条件など）を見つけだして、最も効率の良い蒸気タービンの運転条件を見つけ出すための基本ツールの開発を行う。	坑内二相流動シミュレータ（定常、非定常）の開発を行い、実際の坑井で発生する系統除外現象の解明を行った。S発電所の不安定な生産井のO&Mの最適化には、貯留層の変動が大きく関わっており、実施計画段階での予想通り、貯留層も含めて解析を行うことが必要であることが明らかになったため、今後の課題とした。蒸気生産ネットワーク全体としては、坑内シミュレータとEnergy-WINの併用によって模擬計算可能である見通しをつけた。	○
⑤地熱特有のM&Mセンサー技術の開発	圧力・温度などとともに地熱特有の分析が必要なものとして弁開度の操作ログの自動計測と管内二相流量測定等の計測技術の地熱発電プラントへの適用可能性について調査・評価する。	M2Mセンサー技術の現状調査（メーカーヒアリング）と地熱環境で利用可能なセンサー技術調査を実施して、完全な二相流量測定には未だ技術開発が必要であること、弁開度計測は既存の技術が適用可能であることが判明した。	○
⑥AI技術を活用した地熱発電設備O&Mの最適化	プラントのM2Mセンサーとして画像認識やドローンによる異常検知技術の地熱発電設備O&Mへの適用可能性を検討するとともに、②および③で体系化した教師データに基づき、AI技術を活用した地熱発電設備O&Mの最適化システムの開発を行う。	蒸気・熱水系合流蒸気制御系の推定システムとして深層畳み込みニューラルネットワークや圧力波形予測（ARDCNNモデル）による坑口圧力異常検知手法を開発して運転員に替わり、圧力急減という異常の予兆を検知する見込みを得た。また、ドローンによる配管点検システムを開発した。振動する生産井での圧力急減異常を予兆することができた。振動計の利用については、坑井の変化を検知できる見込みがしたが、観測期間中圧力急減現象に遭遇せず、目的での有効性については保留し、今後の課題とする。	○

IV. 事業化へ向けての見通しと取組みについて

(1) 本件で開発するシステム活用の方向性

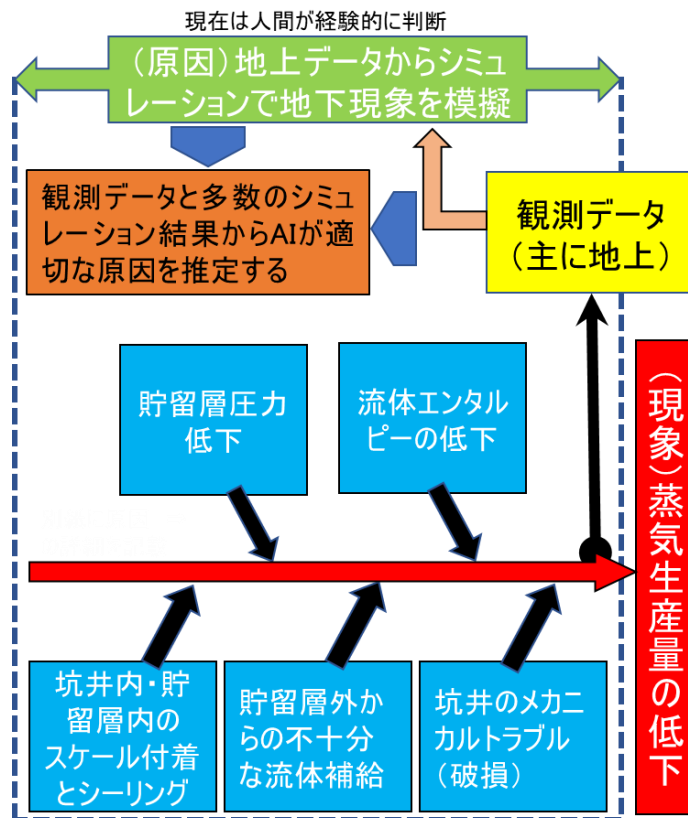
今回、生産井の系統除外問題を検討して、12時間以内での予兆検知と模擬的な発電所データを用いて、15%の利用率向上が可能である結論を得ることができた。また、個々の要素技術として、① 発電設備モデルの構築と発電サイクルシミュレーション、② 蒸気生産ネットワークにおける定常坑内流動シミュレーションによる坑口生産特性曲線の算出ならびにタービン入口での蒸気状態のシミュレーション、③ 非定常坑内流動シミュレーションによる生産井の系統除外問題の解明、④ 畳み込みニューラルネットワーク、FFT、圧力波形予測 (ARDCNN) などの機械学習手法によるトラブル予測、⑤ ドローンによる設備監視システムの構築、⑥ 新しいセンサ技術 (振動, 二相流量計, 弁開度) などの導入可能性の検討 などの成果を得ることができた。

一方、生産井の系統除外問題については、周辺の生産井・還元井等の関与が予測され、系統除外問題の解決あるいは緩和には、今回は研究の計画範囲ではなかった地熱貯留層の変動についても総合的に判定することが必要であることが判明した。

また、合流気水分離方式を採用する地熱発電所では、個々の生産井の二相流量が把握されていないため、正確な解析が困難であることが判った。一方、連続測定が可能な二相流量計は未だ開発途上であるため、この開発は大きな課題であることが判明した。

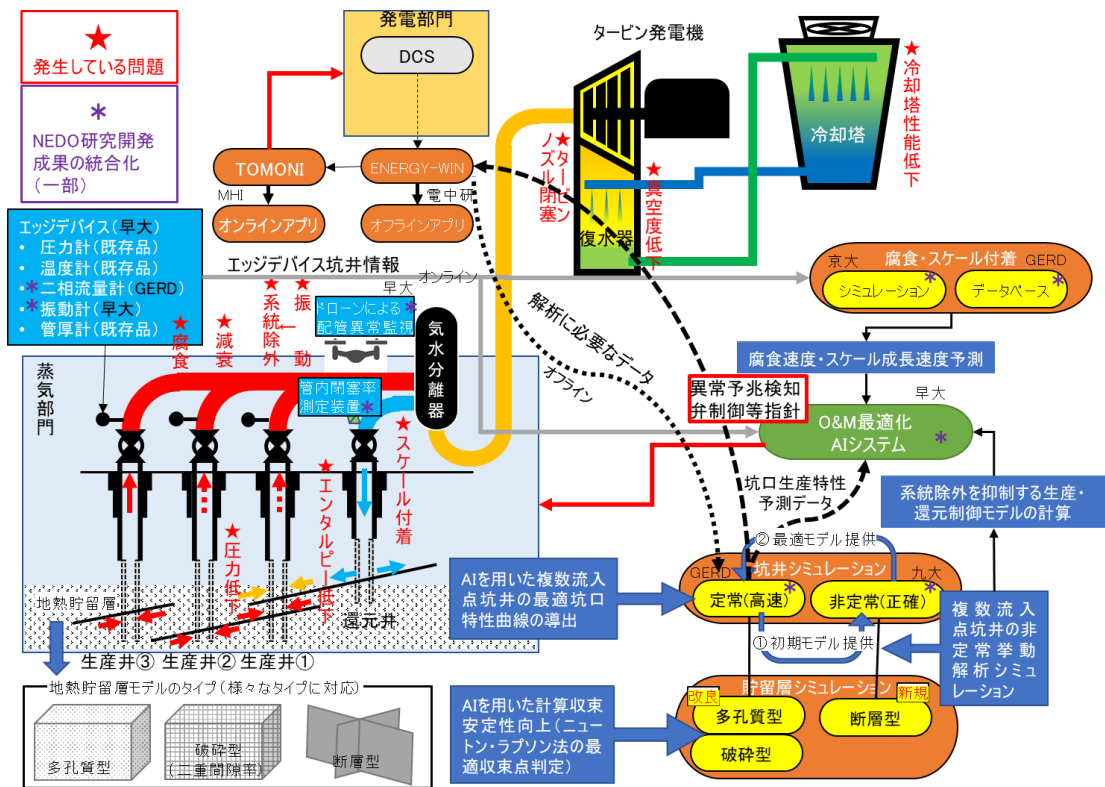
更に、地熱発電所の利用率低下を引き起こす現象は、今回主に検討した坑井間の干渉問題だけではなく、例えば、スケール付着や腐食など様々な問題がある。

これらの問題を整理すると、以下の通りとなる。



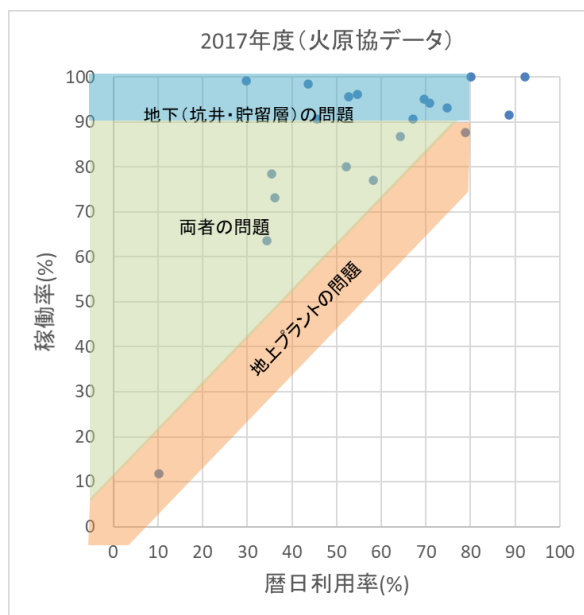
図IV-1 蒸気生産量の低下が発生する原因と原因の推定方法
(シミュレーション+AI) の概念

今後は、NEDO の継続研究等を利用して、これらに関して先行して実施された NEDO 等での研究成果も取り込んだ上で、ここで挙げた課題を総合的に取り扱うことが可能な AI 技術を活用した地熱発電設備 O&M の最適化技術として「地熱発電システムの持続可能性を維持するための IoT-AI 技術」の完成を目指す。現在、検討中の技術の体系図を以下の図に示す。



図IV-2 「地熱発電システムの持続可能性を維持するためのIoT-AI技術」の概念図

(2) 将来的な酸性熱水活用の可能性と対策技術への期待
現状の既設地熱発電所の利用率と稼働率を以下に示す。



図IV-3 暦日利用率と稼働率の関係

多くの地熱発電所ではタービンは回っている（稼働率が高い）が、坑井からの蒸気供給が足りない（利用率が低い）、すなわち多くの問題が地下（坑井・貯留層）に原因があることは明らかである。しかしながら、地下の問題の解明にはシミュレーションなどの高度な専門性を有する技術が必要とされることから、この部分をAIが補うことで、運転員が利用できるようになり、発電所の利用率向上に寄与することが期待される。

本システムは、既存、新規を問わず、全ての地熱発電所で適用可能であることから、対象となるマーケットは、地熱発電所すべてが対象となる。また、国内の地熱タービンメーカーが海外での地熱発電所建設を行う場合にもパッケージとして利用できることから、その利用の範囲は広範囲に亘ると考えられる。

普及に当たっては、AI（特に、アルゴリズムのアップデートや教師データの更新など）やシミュレーション（特に、バージョンアップ）のメンテナンスには専門性が必要とされることから、クラウドサービス（Azure など）での利用として、年間利用料という形式で費用回収を行うことも考える必要がある。これによって、国内ばかりでなく海外での利用についても、インターネット環境の整備という条件はあるものの、コスト削減に結び付くものと考えられる。

以上

個別テーマ (2.6)

(2) 地熱エネルギーの高度利用化に係る技術開発

(2.6) 地熱資源適正利用のための AI-IoT 温泉モニタリングシステムの開発

委託先：国立研究開発法人産業技術総合研究所、横河電機株式会社、
地熱エンジニアリング株式会社、西日本技術開発株式会社

II. 研究開発マネジメントについて (事業の計画内容)

(2.6.1) 背景と目的

本事業は、地熱発電の導入拡大を促進することを目的とし、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ことを目的として実施した。

地熱発電の導入拡大のための最重要課題の一つに「地熱開発と温泉の共生」がある。しかしながら、発電目的の開発ターゲットである天然熱水系と温泉資源の間の水理学的関連性を完全に明らかにすることは困難であり、また、地熱開発地域でディベロッパーらが年数回の頻度で実施している温泉水サンプリングにより地熱開発が温泉へ与える影響を評価可能であるか疑念を抱く源泉所有者は少なからず存在する。これらの理由により、地熱発電と温泉の共生を合理的な手法により実現させることが困難となっている。本提案への参画者は、NEDO からの委託を受け、温泉の基本的性質の変動をモニタリング可能な「簡易遠隔温泉モニタリング装置」の開発（以下、「先行研究開発」と呼ぶ）を FY2014～2017 に実施し、温泉配管を流通する温泉水の流量、温度、圧力、電気伝導率をコンサルタント業者らが実施している温泉水サンプリングと同等の精度、分解能で連続測定可能（1 サンプル/分）な装置を実現し、国内 11 地点で実証試験を行ってきた（図 II-1）。



図 II-1：受託者が先行研究開発を通じて開発した「簡易遠隔温泉モニタリング装置（実証試験器）」

本先行研究開発により「地熱発電と温泉の共生」を実現するためのハードウェアの基本部分を開発することができたが、地熱発電が温泉に与える影響をデータにより説明するためには、取得したデータの解析・解釈方法を確立することが不可欠であり、本事業ではAI の概念を用いてこの課題を解決することを目指す。

本事業の受託者らは、先行研究開発における実証試験、室内実験を通じて本モニタリング装置の評価を行った結果、スケール付着量が 1mm 程度以下であれば、コンサルタント業者らが実施している温泉水サンプリングと同等以上の精度、分解能でデータを連続的に取得可能であることを示している。このことは、本装置により取得したデータを AI システムのひとつである回帰学習型 AI システムにより処理し、気象条件や人為的行為等の影響因子の抽出と除去が可能であることを示唆しているとともに、回帰学習型 AI システムの開発により温泉変動要因の説明と地熱発電が温泉へ有意な影響を与えた場合、その検知が可能になると考えた（図 II-2）。

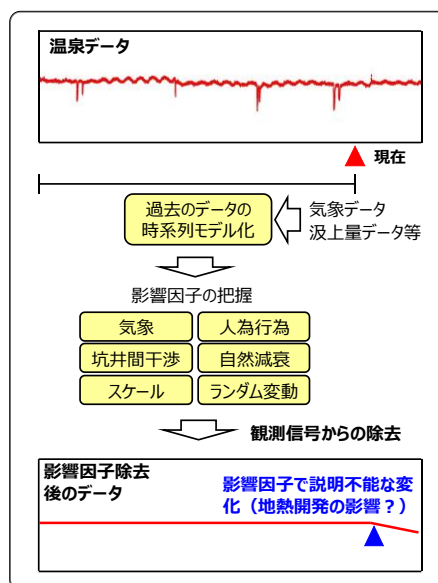
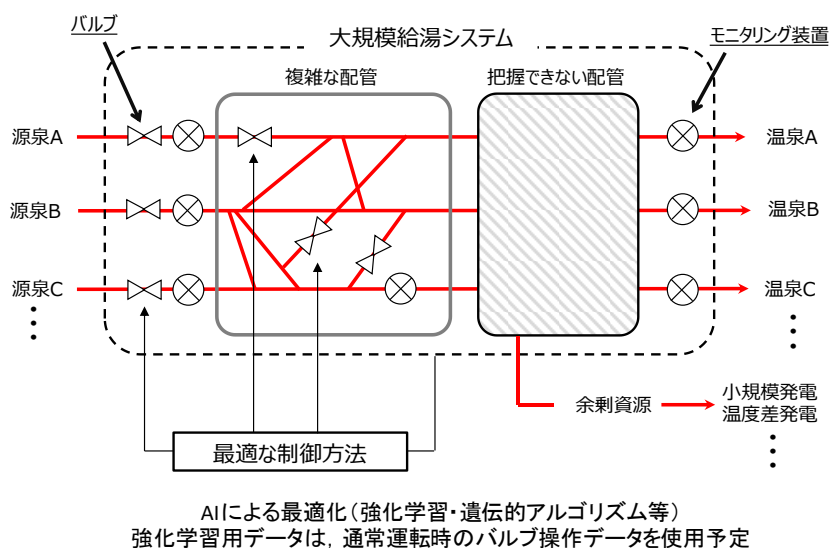


図 II-2：「地熱発電と温泉の共生のための AI システム」
として検討・開発を行う回帰学習型 AI システムの一例

また、先行研究開発を通じて地熱発電所の開発が温泉へ与える影響の可能性について予備的検討を行った結果、長時間（数か月以上）の遅れを有して温泉への緩やかな影響が生じる可能性が指摘されている。このような場合、回帰学習型 AI システムに基づき、有意な影響の有無を評価するためには、少なくとも開発行為開始前数年間のデータを解析する必要がある。本受託者らは先行研究開発およびその後の自費研究により、温泉地で2年以上にわたってデータを取得しており、これを用いて AI システムの評価を実現できるという優位性も有している。

一方、先行研究開発の一部として実施した実証試験を通じて、特に、温泉を集中管理している地域で、必ずしも温泉資源が適切に管理、利用されていない事例が存在することも明らかとなってきた。すなわち、旧式の大規模システムで源泉管理を行っているために多額の費用や労力を費やしている例や、余剰熱資源があるにも関わらず、それを発電等に利用できないでいる例が少なからずある。本事業では限られた地熱資源を発電、熱利用に適切に利用可能とするため、温泉モニタリング装置をIoT装置と位置付け、クラウド上でのAIシステムを介して温泉資源の適正管理・利用AI-IoTシステム（図II-3）を開発し、温泉地で大規模導入が可能なシステムの実現を目指すこととした。



図II-3：温泉資源の適正管理、付加価値創出のためのAIシステム概念

(2.6.2) 研究開発の概要

受託者らがNEDOプロジェクトを通じて開発してきた簡易遠隔温泉モニタリング装置をベースに、AI-IoT温泉モニタリングシステムを開発する。このために、理論的検討と実データ解析を通じて、AI機能やIoTシステム等を開発するとともに、実証試験を通じて性能評価・課題抽出を行う。本事業により、①地熱発電が温泉へ与える影響の定量的評価、および②温泉地等における地熱資源の適正利用の2点を実現可能にする。

本事業全体としての達成目標は以下の通りである。

I. 地熱発電と温泉の共生のためのAI-IoTシステムの開発

地熱資源が温泉に与える影響の定量評価が可能なシステムを開発し、温泉泉質（流量、温度等）の変動要因を60%以上判別可能なシステムを実現する。

II. 温泉資源適正利用のためのAI-IoTシステムの開発

温泉資源の適正な供給に資するデータを提供可能にするとともに、温泉資源適正利用により、温泉管理者の作業時間を現状に比して 20%程度低減できる AI-IoT システムを実現する。

各研究開発項目の概要は以下の通り。

「I. 地熱発電と温泉の共生のための AI-IoT システムの開発」

I-①AI-IoT 温泉モニタリングシステム の概念設計・仕様策定

*「地熱発電と温泉の共生のための AI システム」のために必要な AI 機能、特に回帰学習モデルを中心に検討し、事例調査等を通じて、回帰学習モデル（時系列モデル）の概念に基づく AI 処理システム の概念設計を行う。

I-②AI 機能開発

*回帰学習モデル（時系列モデル）を利用した「温泉変動要因検出法」の研究開発を行う。気象条件や潮汐等の外部影響のモデル化、除去法等について検討を行った後コーディングを行う。模擬信号を使用して性能評価を行ない、温泉泉質の外的要因による変動（5%程度）を検出可能なシステムを実現する。

*これまでに取得してきた実データを使用して、配管清掃、給湯量変化等的人的行為や欠測・異常値の判別、および除去法等について検討する。

*模擬データ、実データを用いて、完成した AI ソフトウェアの性能評価を行い、「原因不明の温泉変動検出能力」の評価を行う。

I-③温泉変動モニタリングによる基礎データ収集

*先行研究開発「温泉モニタリング装置開発」にてデータ収集していた温泉地のうち 5 地点の泉質データ・気象データ取得、手ばかり測定データ取得を継続実施し、AI 機能開発のための基礎データを取得する。

*実証試験候補地である東北地方・北海道地方等の地熱地域を中心に地熱貯留層、温泉に関する基礎的データを収集する。

I-④IoT、センサ開発

・ 先行研究開発で開発した温泉モニタリング装置に必要な通信機能、エラー通知機能等を組み込み、地熱発電が温泉へ影響を及ぼした場合に、それを検出可能な能力についての仕様を検討し、必要に応じて機能向上・機能追加を行う。

I-⑤実証試験

*実証試験地候補である東北地方・北海道地方等の地熱開発地域において、温泉の状況等を調査するとともに関係者への説明を行い、実証試験に関するコンセンサスを得る。

*実証試験地候補から選択した地熱開発地域・温泉発電地域近傍の源泉（2 地点）でのモニタリングを開始する。取得した信号は I-②で開発した回帰学習型 AI システムへ入力し、データの評価を行うとともに、AI ソフトの改良のために用いる。

I-⑥まとめ

* 「地熱発電と温泉の共生のための AI システム」のシステム構成、ビジネスモデル、運用法を策定するとともに、今後の課題を抽出する。

本部分の達成目標と設定根拠を表 II-1 に示す。

表 II-1 「I. 地熱発電と温泉の共生のための AI-IoT システムの開発」
研究開発目標と根拠

実施項目	達成目標	目標設定根拠
I-①AI-IoT 温泉モニタリングシステムの概念設計・仕様策定	地熱発電と温泉の共生のための AI-IoT システムの具体的な仕様（入出力、変動外部要因検出能力、アルゴリズム等）を決定。	入手可能なデータ、温泉モニタリング装置の機能・性能等から、PJ 期間内に実現可能なシステムの仕様を第一に決定することが必要と判断したため。
I-②AI 機能開発	温泉モニタリング装置で検出した温泉泉質（流量、温度等）の変動要因を 60%以上判別可能なシステムを実現。	地域により異なるものの、主要な温泉変動要因は 10 以下と判断しており、それらの 6 割について、泉質へ有意な影響を与えているか否かを判別し、有意な影響分を除去できれば、地熱発電が温泉に影響を与えた場合、それを検出可能と判断しているため。
I-③温泉変動モニタリングによる基礎データ収集	先行研究開発後、継続して温泉モニタリングを実施している 5 地点で 4 年間以上にわたるほぼ連続したデータを取得する。	地下の水理学的特性に依存するが、地熱発電が温泉へ影響を与える場合、遅延と時定数が数か月～数年程度になる事例があると想定しているため、実データを用いた AI システムの評価のためには極力長期にわたるデータ取得が必要のため。

I-④IoT、センサー開発	I-③の結果を踏まえ、地熱発電が温泉へ影響を及ぼした場合に、それを検出可能な能力を有する装置を実現する。	AI システムにより、地熱発電が温泉へ影響を及ぼした場合にそれを検出可能にするためには、十分な品質を有した泉質データを取得することが不可欠であるため。
I-⑤実証試験	地熱開発地域・温泉発電地域近傍の源泉（2地点）でのデータ取得、AI システムによるデータ解析を実施し、泉質変動の要因を複数特定する。	I-②で開発予定の AI 機能の目標性能から、複数の泉質変動要因を特定可能と判断しているため。
I-⑥まとめ	「地熱発電と温泉の共生のための AI システム」のシステム構成、ビジネスモデル、運用法を策定する。	当該PJ 終了後に本システムを広く実用化するために不可欠であると判断しているため。

「II. 温泉資源適正利用のための AI-IoT システムの開発」事業内容

II-①AI-IoT 温泉モニタリングシステムの概念設計・仕様策定

*「温泉資源の適正管理・利用 AI-IoT システム」に関する実証試験予定地である別府市を想定し、別府市が管理する温泉の現状調査、関係者からのヒヤリング結果等を勘案し、AI-IoT システムの構成、機能、性能等を策定する。

II-②余剰資源活用モデル・DB 構築

*別府市が管理する温泉の調査等をベースに温泉資源利活用モデル、データベース等の構築を開始する。また、別府市における温度差発電の利用環境、用途等の基礎データを収集する。

*別府市が管理する温泉の調査等をベースに温泉資源利活用モデル、データベース等を構築し、クラウド上へ組込可能にする。

II-③AI 機能開発

- ・ II-①での成果をもとに温泉資源の適正管理、付加価値創出のための AI ソフトを開発開始する。別府市に設置する温泉モニタリング装置や既存のシステムから得られるデータ等ベースに、温泉水供給の最適化法について検討を行う。
- ・ 温泉資源の適正管理、付加価値創出のための AI ソフトの開発を継続する。温泉水供給の最適化法と有効利用可能な余剰資源等の算出の実現を目指す。また、強化学習や遺伝的アルゴリズム等を用いて、人的バルブ制御のフィードバック量等を導出し、温泉資源適正利用のためのソフトウェアを製作し、評価を行う。

*実証試験結果等をもとにソフトのブラッシュアップを図る。源泉の管理を半自動で行える AI-IoT システムを提案し、小規模発電等に利用可能な余剰温泉水量・エネルギーを提示する。

II-④IoT、クラウド、センサ、温度差発電ユニット開発

*別府市に設置した温泉モニタリング装置の計測データを、収集・処理・可視化するのに必要な機能（ダッシュボードやメール通知システム）を組み込んだクラウドシステムの開発を継続する。また、別府市の管理する温泉給湯系の配管変更を温泉モニタリングシステムに柔軟に取り込めるシステム編集機能を実現する。加えて、秘密性の観点からシステムのセキュリティ評価を実施する。

*別府市での多点長期連続モニタリング用装置（自己診断機能、ソフト・ハードウェア対応等）の設計、製作、評価を行う。

*別府地域でのモバイル機器充電、LED 照明等を目的とした温度差発電ユニットの設計・製作・評価を継続する。温度差発電による年間 20kWh 以上の発電に目途を付ける。また、温度差発電でのモバイル機器充電サービス等の暫定運用を実施する。

*必要に応じて、別府市での多点長期連続モニタリング用装置（自己診断機能、ソフト・ハードウェア対応等）の改良を行う。（実施体制：○横河電機、産総研）

II-⑤実証試験

*別府市が所有する温泉配管に温泉モニタリング装置を別府市が所有する温泉配管に温泉モニタリング装置を設置し、全体で 11 台でのモニタリングを実施する。また、これらの装置から送信されるデータを取り込み、クラウドを介して AI-IoT 温泉モニタリングシステムを構築する。本システムを使用して、連続モニタリングを実施する。また、このシステムにより取得した信号を用いて、温泉資源の適正管理に必要な温泉水制御用データへと変換出力するクラウドシステムの実証試験を実施する。

*温泉資源管理情報等の情報をもとにしたビジネス創出等の地域経済活性化クラウドシステムの構想の取りまとめを行う。

II-⑥まとめ

*「温泉資源の適正管理・利用 AI-IoT システム」に関して、システム構成、ビジネスモデル、運用法を策定するとともに、今後の課題を抽出する。

本部分の達成目標と設定根拠を表 II-2 に示す。

表Ⅱ-2 「Ⅱ. 温泉資源適正利用のための AI-IoT システムの開発」

研究開発目標と根拠

実施項目	達成目標	目標設定根拠
Ⅱ-①AI-IoT 温泉 モニタリングシス テムの概念設計・ 仕様策定	別府市所有温泉配管・施設を 対象とした AI-IoT システム の構成、機能、性能等を策定	別府市の温泉給湯システム 固有の課題を十分把握し、そ の解決に資するシステムの 実現を目指すことが将来的 な事業化のために必要と判 断したため。
Ⅱ-②余剰資源活 用モデル・DB 構築	温泉資源利活用モデル、デー タベース等を構築し、クラウ ド上へ組込可能にする	本項目で開発する AI-IoT シ ステムは(a)給湯系統の最適 制御、(b)温泉資源の適正利 用の 2 つの目的に使用する 予定であり、データベースに 必要である温泉水利用状況 の把握し、これらのデータを 利用できる状態の構築を行 う必要があるため。
Ⅱ-③AI 機能開発	給湯システムの管理を半自 動で行える AI-IoT システム を開発し、温泉資源の適正な 供給に資するデータを提供 可能にするとともに、温泉管 理者の作業時間を現状に比 して 20%程度低減できる AI- IoT システムを実現	別府市においては複雑な配 管の管理が大きな課題とし て取り上げられており、本 AI-IoT システムにより人的 作業の削減を図れば、普及 に際し大きなインパクトと なると判断したため。
Ⅱ-④IoT、クラウ ド、センサ、温度差 発電ユニット開発	別府市での温泉モニタリン グシステムの実証試験に必 要な構成要素であるモニタ リング装置、IoT クラウド等 を開発。 温度差発電による年間 20kWh 以上の発電を実現	Ⅱ-①で策定した仕様を満た す IoT システムを開発する ことが必要であるため。 温泉熱を利用した発電シス テム出力の試算を行った結 果、最大 20kWh/(年・台)程 度の発電量を見込めるとい う結果が得られているため。

II-⑤実証試験	別府市が所有する温泉配管に温泉モニタリング装置を10台以上設置し、クラウドを介してAI-IoT温泉モニタリングシステムを構築し、システムに実証試験を実施。	AI-IoTシステム、温度差発電システムの実用上の課題抽出、ブラッシュアップのために不可欠であるため。
II-⑥まとめ	温度差発電実証試験を実施。 「温泉資源の適正管理・利用AI-IoTシステム」のシステム構成、ビジネスモデル、運用法を策定	当該PJ終了後に本システムを広く実用化するために不可欠であると判断しているため。

(2.6.3) 事業スケジュール

本事業の研究期間は、2018年7月3日より2021年2月28日であり、主な事業スケジュールの概要を図Ⅱ-4に示す。

事業項目	2018年度				2019年度				2020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
I. 地熱発電と温泉の共生のための AI-IoT システムの開発												
I-①AI-IoT 温泉モニタリングシステムの概念設計・仕様策定		→										
I-②AI 機能開発		→										
I-③温泉変動モニタリングによる基礎データ収集		→										
I-④IoT、センサ開発		→										
I-⑤実証試験		→										
I-⑥まとめ												→
II. 温泉資源適正利用のための AI-IoT システムの開発												
II-①AI-IoT 温泉モニタリングシステムの概念設計・仕様策定		→										
II-②余剰資源活用モデル・DB 構築		→										
II-③AI 機能開発		→										
II-④IoT、クラウド、センサ、温度差発電ユニット開発		→										
II-⑤実証試験		→										
II-⑥まとめ												→
研究開発推進委員会		○	○		○			○		○		○

図Ⅱ-4 研究開発のスケジュール

(2.6.4) 研究開発の実施体制

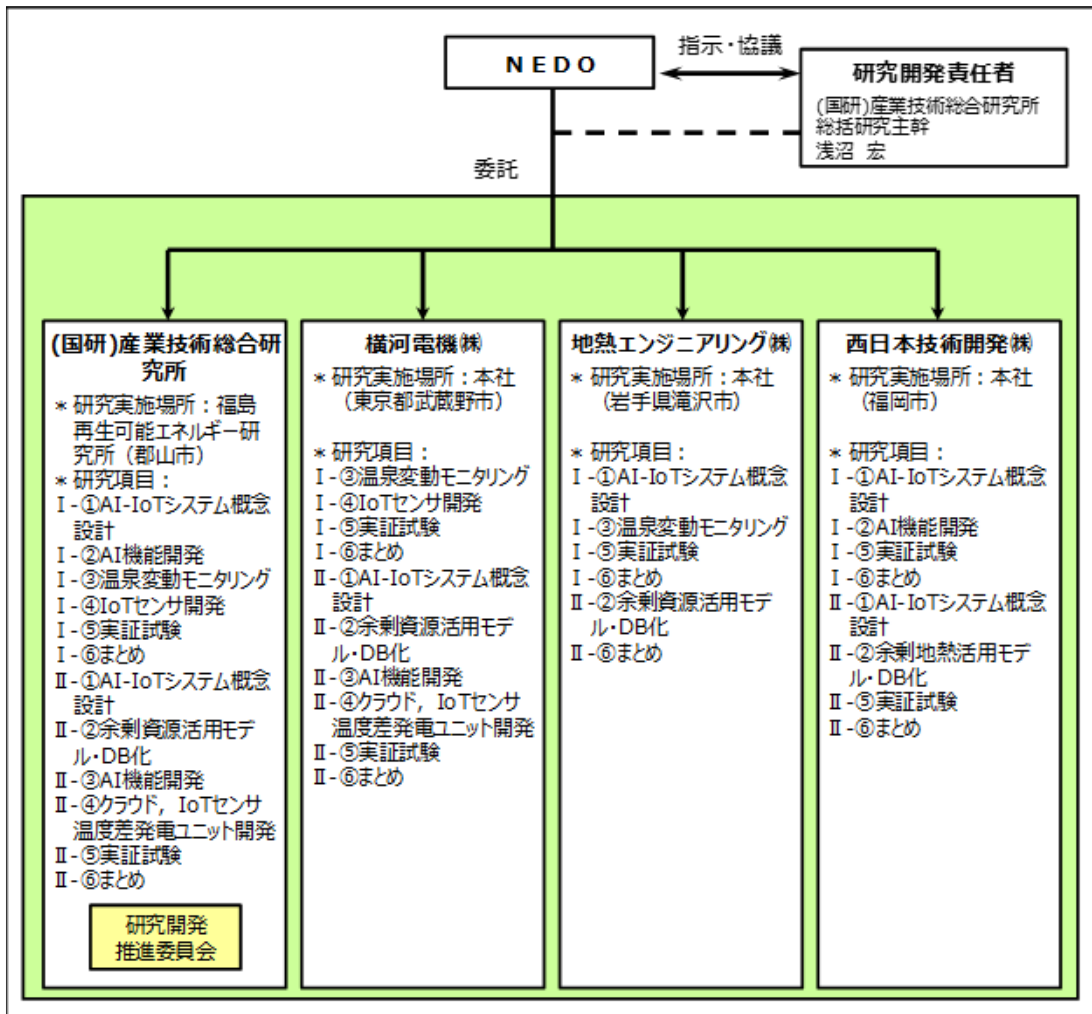


図 II-5 研究開発の実施体制

(2.6.5) 事業の管理運営

表 II-3 地熱資源適正利用のための AI-IoT 温泉モニタリングシステムの開発
研究開発推進委員会 (2021.2 時点)

役割	氏名 (所属)
委員長	野田徹郎 (産総研名誉リサーチャー)
委員	益子 保 (益子温泉調査事務所)
委員	工藤圭介 (別府市観光戦略部温泉課)

Ⅲ. 研究開発成果について

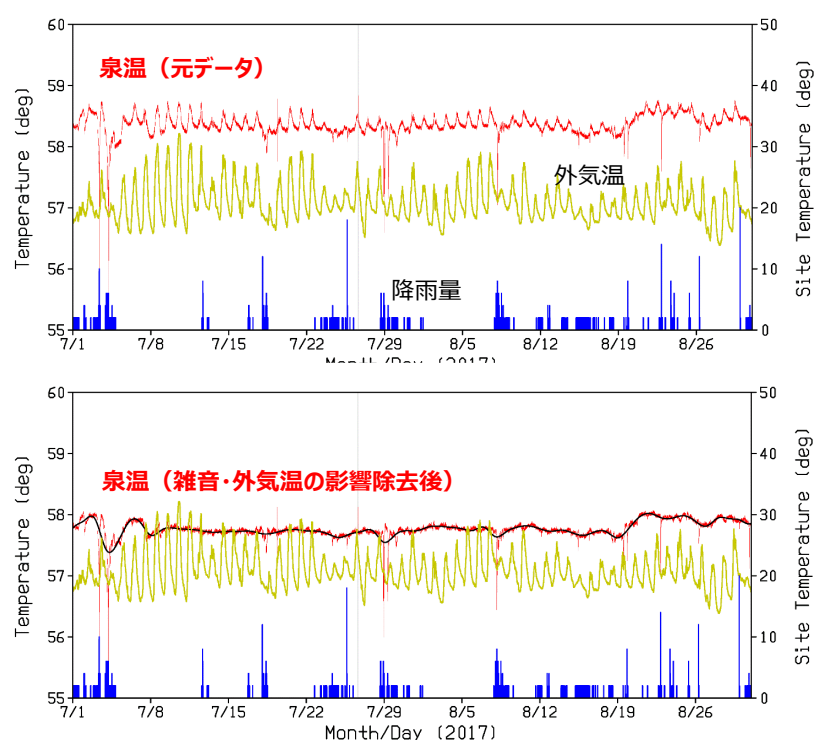
本事業の主な成果は以下の通り。

I. 地熱発電と温泉の共生のための AI-IoT システムの開発

地熱資源が温泉に与える影響の定量評価が可能なシステムを開発し、現在想定される温泉泉質（流量、温度等）の変動要因の全てを判別可能なシステムを実現した。

Ⅱ. 温泉資源適正利用のための AI-IoT システムの開発

温泉資源の適正な供給に資するデータを提供可能にするとともに、温泉資源適正利用により、温泉管理者の作業時間を現状に比して 20%以上低減できる AI-IoT システムを実現した。



図Ⅲ-1：回帰学習型 AI や統計数理学的手法により、泉温データに含まれる、降雨、外気温等の変動要因の影を検出／除去可能であることを示した。

[最終目標に対する成果と達成度]

表Ⅲ-1 「Ⅰ. 地熱発電と温泉の共生のための AI-IoT システムの開発」

最終目標に対する成果と達成度

実施項目	成果	達成度
I-①AI-IoT 温泉 モニタリングシ ステムの概念設 計・仕様策定	地熱発電と温泉の共生のための AI-IoT システムの具 体的な仕様（入出力、変動外部要因検出能力、アルゴ リズム等）を決定した。	100%
I-②AI 機能開発	現在想定される温泉泉質（流量、温度等）の変動要因 を 100%判別可能なシステムを実現した。	100%
I-③温泉変動モ ニタリングによ る基礎データ収 集	先行研究開発後、継続して温泉モニタリングを実施し ている 5 地点（+自費取得 2 地点）で 4 年間以上にわ たるほぼ連続したデータを取得した。	100%
I-④IoT、センサ 開発	I-③の結果を踏まえ、地熱発電が温泉へ影響を及ぼ した場合に、それを検出可能な能力を有する装置を実 現した。	100%
I-⑤実証試験	地熱開発地域・温泉発電地域近傍の源泉（2 地点）で のデータ取得、AI システムによるデータ解析を実施 し、泉質変動の要因を複数特定した。	100%
I-⑥まとめ	「地熱発電と温泉の共生のための AI システム」のシ ステム構成、ビジネスモデル、運用法を策定した。	100%

表Ⅲ-2 「Ⅱ. 温泉資源適正利用のための AI-IoT システムの開発」
最終目標に対する成果と達成度

実施項目	達成目標	達成度
Ⅱ-①AI-IoT 温泉 モニタリングシ ステムの概念設計・ 仕様策定	別府市所有温泉配管・施設を対象とした AI-IoT シ ステムの構成、機能、性能等を策定した。	100%
Ⅱ-②余剰資源活 用モデル・DB 構築	温泉資源利活用モデル、データベース等を構築し、 クラウド上へ組込可能にした。	100%
Ⅱ-③AI 機能開発	給湯システムの管理を半自動で行える AI-IoT シ ステムを開発し、温泉資源の適正な供給に資する データを提供可能にするとともに、温泉管理者の 作業時間を現状に比して 20%以上低減できる AI- IoT システムを実現した。	100%
Ⅱ-④IoT、クラウ ド、センサ、温度差 発電ユニット開発	別府市での温泉モニタリングシステムの実証試験 に必要な構成要素であるモニタリング装置、IoT クラウド等を開発した。 温度差発電による年間 20kWh 以上の発電を実現し た。	100%
Ⅱ-⑤実証試験	別府市が所有する温泉配管に温泉モニタリング装 置を 11 台設置し、クラウドを介して AI-IoT 温泉 モニタリングシステムを構築し、システムに実証 試験を実施した。 温度差発電実証試験を実施した。	100%
Ⅱ-⑥まとめ	「温泉資源の適正管理・利用 AI-IoT システム」の システム構成、ビジネスモデル、運用法を策定し た。	100%

IV. 事業化へ向けての見通しと取組みについて

実用化・事業化を行う製品・サービス

【産業技術総合研究所】中立的な立場で「地熱発電と温泉の共生」のための正確な科学的データを提供するために本事業の成果を使用する。また、同時に温泉を含む広義の地熱資源の最適利用システム設計にも利用する。

【横河電機㈱】地熱発電企業、蒸気生産管理企業、温泉関連業者、温泉管理を行う自治体等を対象として、「地熱資源適正利用のための AI-IoT 温泉モニタリングシステムの開発」で得られた温泉モニタリングシステムの販売・サービスを行う。

【地熱エンジニアリング㈱、西日本技術開発㈱】個人温泉業者（権利者）、温泉事業団

体、温泉事業を管轄する地方自治体、地熱開発ディベロッパーを対象に温泉モニタリング装置のインストールに関するコンサルティング業務、メンテナンス業務を実現する。

実用化・事業化への取組

【産業技術総合研究所】「地熱発電と温泉の共生」のためAIシステムのブラッシュアップを行うとともに、本システムのアウトプットをベースにした発電事業者と源泉所有者の合意形成法、温泉への影響判断のための枠組み、補償体制等を検討する。

【横河電機㈱】「地熱資源適正利用のためのAI-IoT温泉モニタリングシステム」の機能向上を図るとともに海外マーケットの開拓を行う。

【地熱エンジニアリング㈱、西日本技術開発㈱】システムとモニタリングデータの価値を高めるためのインストール法、メンテナンス法を開発する。

個別テーマ (2.7)

(2) 地熱エネルギーの高度利用化に係る技術開発

(2.7) IoT-AI 適用による小規模地熱スマート発電&熱供給の研究開発

委託先：一般財団法人エンジニアリング協会、
一般財団法人電力中央研究所、
国立大学法人東京海洋大学、
伊藤忠テクノソリューションズ株式会社

II. 研究開発マネジメントについて (事業の計画内容)

(2.7.1) 背景と目的

2012年の固定価格買取制度(FIT)の施行以降、温泉井を利用する1,000kW未満の小規模地熱発電所は、バイナリー発電を中心に50か所以上(総設備容量約6,000kW(2018年3月末現在))が運転開始した。しかしながら、これらの暦日利用率は、当初国が想定した74.8%(経済産業省資料)に対して54.7%(2017年度の暦日利用率の実績(5.9~100%、N=33)の中央値、(一社)火力原子力発電技術協会資料)と低く、大幅な改善が望まれていた。

そこで本事業では、小規模地熱発電所および熱利用施設を対象に、IoT-AI技術を適用し出力増大、トラブル回避等の効率化を図り、発電所、熱利用施設のトラブル発生率を20%低減することなどによって、暦日利用率¹を10%向上させることを目的に研究開発を行った。

(2.7.2) 研究開発の概要と全体目標

本事業では、他機関と共同で、以下4つの研究開発項目を実施した。

- ① 既存井戸の評価・モニタリング (担当：東京海洋大学、エンジニアリング協会)
- ② 事業性評価・運営 (担当：電力中央研究所、エンジニアリング協会)
- ③ 運転管理 (担当：電力中央研究所、エンジニアリング協会)
- ④ IoT-AIシステム化 (担当：伊藤忠テクノソリューションズ、エンジニアリング協会)

なお、報告書の構成上、本文では②と③の章立てを逆に記載した(②が5章、③が4章)。

【全体目標】

研究開発項目①~④の定量的目標数値を維持し、対象とするトラブル事例の20%以上において異常予兆検知が可能であることを確認することにより、『トラブル発生率20%低減』が達成できることを実証試験により確認する。トラブル回避および発電関連設備・

¹ 本事業では、暦日利用率を【売電電力量÷(認可出力×暦日時間数)】と定義する。

熱利用施設の運用改善による各施設の利用率を試算し、本ツール適用前より『利用率10%向上』することを実証試験により確認する。

『トラブル発生率20%低減』と『利用率10%向上』の確認

後述の「研究開発項目③「運転管理」」に確認結果を示す。

(2.7.3) 事業スケジュール

研究開発項目	2018年度 (2019年2月末まで)	2019年度	2020年度	2021年度 (5月末まで)
①既存井戸の評価・モニタリング ・評価、分析 ・モニタリング	データ収集・評価 既存井戸の計測	分析・EMPへの適用 既存井戸・スケールの計測	EMPへの組込み 既存井戸・スケールの計測	実証試験
②事業性評価・運営 ・発電所 ・熱利用施設 ・全体 ・地域共生	データ収集・分析	事業性評価・運営の データの特定・EMPへの適用	EMPへの組込み	実証試験
③運転管理 ・発電所(井戸含む) ・熱利用施設(井戸含む) ・異常予知検知 ・運転管理支援ツール	データ収集・分析	運転管理支援ツールの 開発・EMPへの適用	運転管理支援ツールの EMPへの組込み	実証試験
④IoT-AIシステム化	下期 POC	E-PLSMをベースに EMPのプロトタイプ構築	EMPのプロトタイプを改良し プロトタイプの完成	

III. 研究開発成果について

1. アンケート・ヒアリング調査・発電停止分析（担当：エンジニアリング協会）

1) アンケート・ヒアリング調査

発電機メーカー、発電事業者、熱利用事業者へアンケートおよびヒアリング調査を行った。ここでは、冷却系統におけるトラブルが多いこと、暦日利用率には50～80%とバラツキがあるものの、概して低い値であること、またメンテナンスに関して機能強化と遠隔管理へのニーズが高いことなどを確認した。

一方、熱利用事業者への調査より、総じて熱利用事業は単体事業としての事業規模は大きくないが、熱水または蒸気を複数の用途で「複合利用」することで、地熱発電事業に副次的な価値を付加する事業としての役割を担っていることを確認した。熱利用事業はいずれも小規模であり、地熱発電事業を含めた全体の事業性向上に寄与していることが明確に示されている事例は存在しないが、経済面だけでなく熱利用を通じ

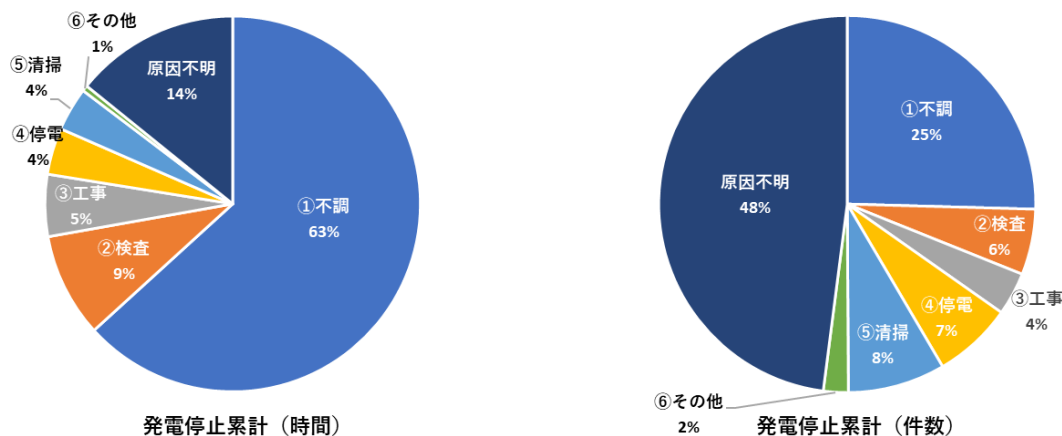
た地域貢献や地熱発電事業の理解促進などの副次的な価値を付加できる事業として今後も導入を進めていくべきであると言える。

しかし、熱利用施設本体ではなく、熱（温水、蒸気）の供給源側に起因するトラブルが多いこと、熱水の温度や流量を自動計測している施設は少なく日常点検として目視による温度・湿度の記録だけを行っている施設も多いことが示された。したがって、熱利用施設に対してIoTあるいはAIを適用することにより、本調査研究の目的（トラブル発生率の低減、暦日利用率の向上）達成に結び付けることはできないと判断し、試行的なものを除いては、熱利用事業へのIoTおよびAI適用は検討対象外とした。

2) 発電停止分析

9つの発電所で計13機の発電機における運転データを受領して発電停止の実態を確認した。発電停止時間の比率は6.8~27.8%と発電機により様々である。複数の発電機を持つ同一発電所では概して同様な値を示しており、また同一発電機でも発電所により値が異なることから、発電停止要因は発電システム全体に依存している傾向がある。なお、受領したデータの発電停止時間の合計は1,483日であり、データ分析時間の合計9,329日で割ると平均的な発電停止割合は15.9%となる。

次に5つの発電所の保守点検記録に基づき、発電停止のトラブル原因ならびに定期点検などメンテナンス状況に関する分析を行った。この際、発電停止原因を、①（設備の）不調、②検査、③工事、④停電、⑤清掃、⑥その他、および原因不明の7種類に分類し、発電停止時間と件数を集計した結果は図III-1のようになる。



図III-1 発電停止のトラブル原因ならびにメンテナンス状況の分析結果

上記より、発電停止トラブルの最たる原因は「設備（主に発電機）の不調」であり、復旧時間も1件あたり約3.1日と長いため、最重点項目として対策を講じることが肝要である。一方、②検査、③工事、④停電、⑤清掃は、停電を除き自ら計画・管理できる事項である。これら4つの原因による発電停止時間の合計比率は、設備不調の63%に対して22%に過ぎず、予防保全として検査・工事・清掃の頻度や時間を増やし、それに勝るだけ設備不調の時間が抑えられる可能性があるれば、積極的に検討すべきである。ここに、経験則に基づく検討に加えて、IoT-AIの活用が期待できる。

2. 研究開発項目①「既存井戸の評価・モニタリング」

【事業概要】

全国の小規模地熱発電に適した地熱資源を産出する井戸を選択し、その井戸から地熱資源データ並びにモニタリングデータ、配管のスケールデータを収集する。これより、トラブル発生率の低減と暦日利用率向上に寄与する項目を分析し、AIに取り込める項目と取り込めない項目を整理し、効果のあるものについては研究開発項目④にてシステムを検討して評価する。

【事業目標】

既存井戸および配管のスケールの評価・モニタリングに関する EMP (Energy Management Platform) のプロトタイプを改良した基本ツール(研究開発項目④にて作成)を用いて実証試験を実施し、井戸の健全性と配管のスケール特性を評価し、運転中の井戸と配管スケールのモニタリング状況を実証する。

1) 既存井戸の評価

土湯 16 号源泉バイナリー発電所および奥江温泉地熱バイナリーサイクル発電所を対象として地熱資源データならびにモニタリングデータを収集した。また、収集したデータと坑井の地域性や地質条件を加味して貯留層特性を分析するとともに、井戸に関するトラブル発生率の低減や利用率向上に寄与する項目を分析した。

a. 土湯 16 号源泉バイナリー発電所の既存熱源データの整理と分析結果

2015 年 11 月 1 日から 2020 年 5 月 31 日までの発電実績データを整理、分析し、暦日利用率の評価を行った。既存井戸に起因する主たる発電停止は、井戸内の付着スケールを取り除く浚渫作業であり、それによる累計停止時間は停止時間全体の 11%であった。

長期にわたる源泉の温度、圧力および流量のモニタリングから坑口圧力の安定性が確認され、また定期的な浚渫作業により暦日利用率は 90%前後を維持していることから、源泉状態は健全であると評価した。浚渫工事のタイミングを決定する項目としては、発電量、蒸気・熱水の圧力、温度、流量が挙げられ、これらのデータを AI に取り込むことで最適な浚渫工事のタイミングを見出すことが期待できる。取得、整理した発電機システムおよび源泉状態に関するデータを研究開発項目④にて EMP プロトタイプのデータベースに反映し、同システムの実証試験に供した。

b. 奥江温泉地熱バイナリーサイクル発電所の熱源データの取得と分析結果

源泉配管システムに IoT 機器を新たに設置し、源泉状態(蒸気圧力・温度、蒸気流量、熱水電気伝導度)および発電量に関するデータを取得した。取得、整理した源泉状態に関するモニタリングデータを研究開発項目④にて EMP プロトタイプのデータベースに反映した。モニタリング期間(2019 年 10 月～2020 年 8 月)において、温熱源としての井戸の問題による発電の停止は確認されず、冷却などの冷熱源に起因するト

ラブルが顕著であった。したがって、生産よりは還元または冷却に重点をおいたモニタリングシステムの検討が必要であったと考察される。今後、同様な検討がなされるとすれば、生産に重点を置くモニタリングなのか、冷却や気象などに重点を置くモニタリングが必要なのかを吟味をして、IoT化を行う必要がある。

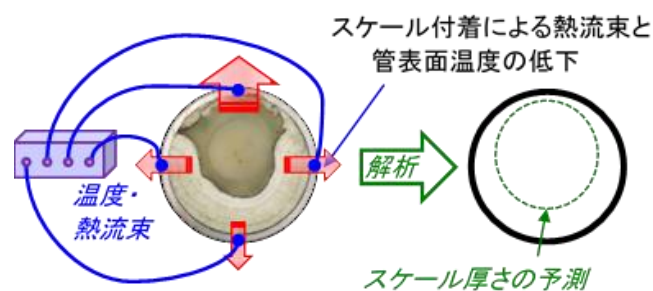
2) スケールモニタリング

小浜温泉バイナリー発電所および奥尻地熱発電所の源泉配管設備を対象として、地熱資源データと配管内のスケール付着状態の時間履歴データを収集、分析した。スケール付着に関するデータの収集には、(国)東京海洋大学が開発した温度測定式スケール付着モニタリング技術(図Ⅲ-2)を用いた。

a. 小浜温泉バイナリー発電所源泉配管のスケールモニタリング

坑口出口、源泉熱交換器入口および出口の3カ所の源泉配管(配管サイズ:150A)を対象として、2019年6月15日から2021年4月30日までスケール付着状態のモニタリングを実施した。本モニタリング技術は、源泉配管内のスケール厚さ分布や成長速度等の状態を把握することができ、スケールに起因した熱源状態の変化と発電電力の関係を評価する上で有効であることを実証した。

小浜温泉バイナリー発電所のスケールの問題は、主として源泉配管系における剥離スケールの源泉熱交換器入口への集積(図Ⅲ-3)に起因した源泉圧力の上昇(閉塞による源泉供給流量低下)とそれに伴う発電出力(源泉供給流量)の低下であることが、現地調査とモニタリングにより明らかとなった。一方、スケール剥離量と熱交換器の閉塞による源泉圧力上昇に強い相関があるものの、発電異常の発生時期に規則性は見られず、したがって、モニタリングによって得られる剥離スケール量の情報から異常発生を将来予測することは困難であるという結論に至った。



図Ⅲ-2 温度計測式スケール付着モニタリング技術



図Ⅲ-3 熱交換器に堆積した剥離スケール

スケール付着状態のモニタリング結果から、スケールの剥離が顕著となる厚さ条件と場所を示すとともに、取得されたスケール厚さのデータに基づいて、スケール成長の将来予測が可能であることを示した。また、スケールのモニタリング結果と過去の源泉配管のメンテナンス履歴から、スケールの剥離量が少ない時期における配管メンテナンスの実施が異常発生頻度の低減において有効となる可能性があることを示した。取得したデータを研究開発項目④にて EMP プロトタイプのデータベースに反映し、同システムの実証試験に供した。

b. 奥尻地熱発電所源泉配管のスケールモニタリング

源泉配管においてスケール成長の有無を確認するため、坑口出口の源泉配管（配管サイズ：200A）を対象として、2020年9月25日から2021年4月30日までスケール付着状態のモニタリングを実施した。その結果、モニタリング期間においてスケール成長は認められなかった。それにより、同発電所において薬液注入によるスケール付着抑制が健全に実施されていることを明らかにした。取得した源泉配管表面温度と熱流束の計測値およびスケール厚さの予測値を、研究開発項目④にて EMP プロトタイプのデータベースに反映した。

3. 研究開発項目②「事業性評価・運営」

【事業概要】

発電所、熱利用施設、発電&熱供給統合システム、および地域共生を対象に、事業化判断、事業性評価や運営について、AIに取り込める項目と取り込めない項目を整理し、効果のあるものについてはシステムを検討して評価する。

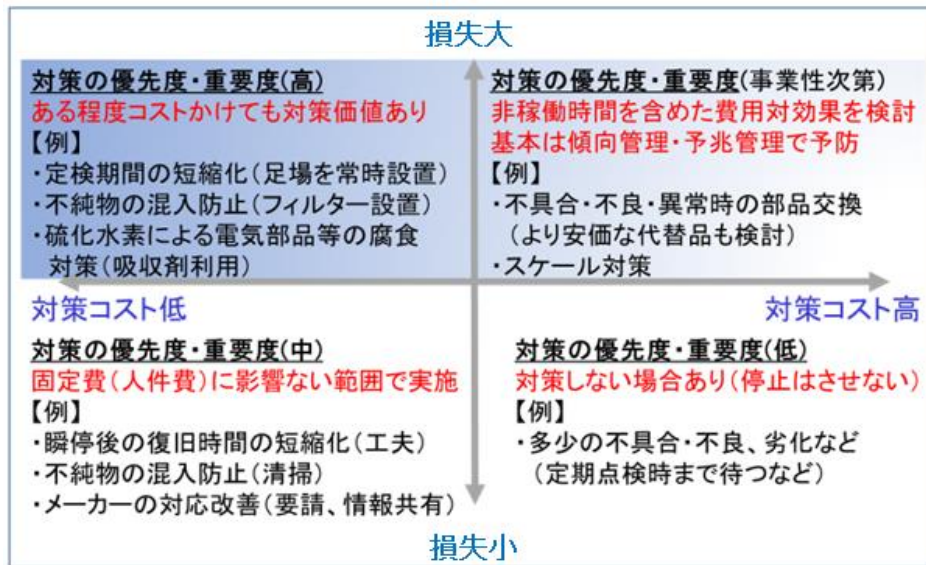
【事業目標】

既設事業の事業コストやリードタイムを対象にして地域経済効果と事業プロセスを可視化し、研究開発項目①～③に係る設備投資を抑えつつ、社会コスト低減の最適化を図る。

1) 事業性評価・運営（担当：電力中央研究所、エンジニアリング協会）

a. 発電所、熱利用施設、発電&熱供給統合システムの事業性

発電所、熱利用施設、発電&熱供給統合システムの事業性を評価するため、文献調査、および調査協力が得られた事業者アンケート・ヒアリング調査を実施した。その結果、熱利用施設単独の事業は全国で様々な規模の事業実績が確認された。一方、発電所に関しては、小規模の場合、特に運転中の運転維持費（修繕費・保守点検費）の低減策を講じ、収益改善することが喫緊の課題と考えられた。ヒアリング調査より、事業者にとっては暦日利用率よりも対策コスト（費用対効果）が重要な評価指標であったため（図）、日常の出力低下による FIT 収益の損失、トラブルによる損失額やその対策費などを金額として可視化すれば、より理解しやすくトラブル対応や行動支援に繋がる可能性が想定された。

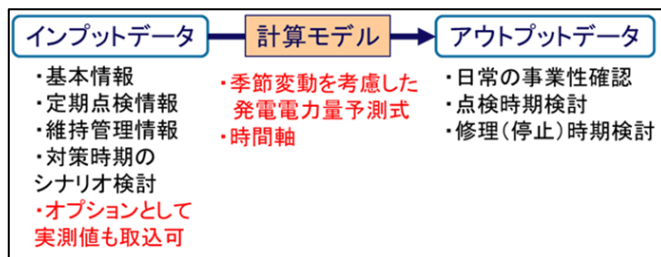
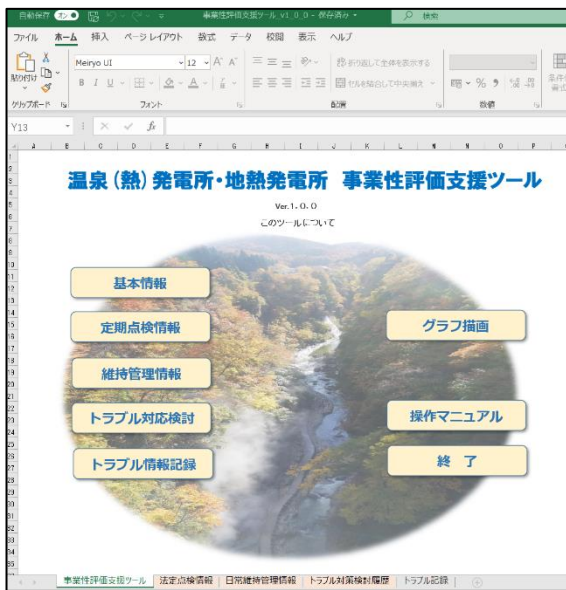


左上の青色部分は、事業者にとって対策の優先度・重要度が最も高いトラブル。右上はトラブルが潜在化しており事業者が予兆に気づきにくいいため、IoT-AI化で早期発見できれば事業性改善効果が高いと考えられる。

図 III-4 小規模地熱発電所のトラブルによる損失の程度と対策コストとの関係

発電&熱供給統合システムに関しては実施例が少なく、小規模発電への熱利用施設の付随は国等補助金利用がないと事業化が難しいこと、生産物の本格的商用化に至るまで期間を要し運営にノウハウが必要である等、事業性が大きな課題であることが明らかとなった。

以上について、AIシステムに取り込める項目の有無を検討した。その結果、今回収集したコスト情報に基づく事業性評価は困難であったが、IoT-AIにより得られた運転データと事業収支を連携すれば将来の事業性評価もある程度可能であることが示唆された。そこで新たに事業性評価支援ツールを開発した(図 III-5)。主な特徴は、メーカー・発電規模・発電方式によらず汎用的・簡便に事業性評価が可能であること(無償での提供)、運転中の事業性改善を支援するためコストを可視化したこと、後述する運転管理支援ツールの分析結果の一部として季節変動を考慮した発電電力量予測式を組み込んでおり実際の運転データがなくても出力を近似できる点が挙げられる。さらに、FIT収益に直接影響する出力の実績値を取り込み可能とした他、点検・修理費等の日常の収支をキャッシュフローとして可視化する機能、および点検情報・トラブル事例等のデータベース管理機能などを搭載した。これにより時間軸を考慮した事業性評価、および情報の一元管理が可能となり、事業者自らが簡便に操作できるという新規性・独自性を有している。



図Ⅲ-5 事業性評価支援ツールのホーム画面（左）およびシステム試算機能（右）

b. 地域共生に係る情報

発電所運営に伴い、地域社会への貢献、配慮事例や周辺環境との調和に関連した法令順守の現状について調査し、関連する条例制定地域、近隣住民等とのトラブル対応事例、FIT 収益の一部を地域振興や地域社会貢献に還元している事例等の最新情報をとりまとめた。

以上について、AI システムに取り込める項目の有無を検討した。その結果、地域共生の検討・改善・向上に役立つ情報（ガイドラインや事例集、法規制・条例、観光・見学・学習会、地域共生方策等）に関し、AI コンシェルジュやチャットボットのような IoT-AI 化を検討した。しかしながら本事業終了後の継続的な情報更新作業の発生およびシステム維持管理費等の継続的責務の点から不適と判断された。また、ヒアリング調査からは IoT-AI 化に関するニーズが確認されなかったため、現状では既存情報の整理で十分と判断された。

地域経済効果や地域付加価値の可視化、社会コスト低減に繋がる最適化、IoT や AI 導入による省人化・省力化と事業性向上に関しては、分析に必要な情報および数値化可能な情報の不足等の理由から IoT-AI 化は不適と判断され、今後の課題と考えられた。

4. 研究開発項目③「運転管理」

【事業概要】

電力中央研究所が保有する発電プラントの熱効率解析ソフトを活用し、井戸下から一次熱交換器、バイナリー発電設備、熱利用施設に至る地熱エネルギー利用設備を一元的に状態監視し、機器等の異常予兆を検知するとともに、最適な発電・熱利用ができるツールを構築する。

【事業目標】

発電関連設備・熱利用施設の計測データの見える化および、各設備の性能解析・評価を

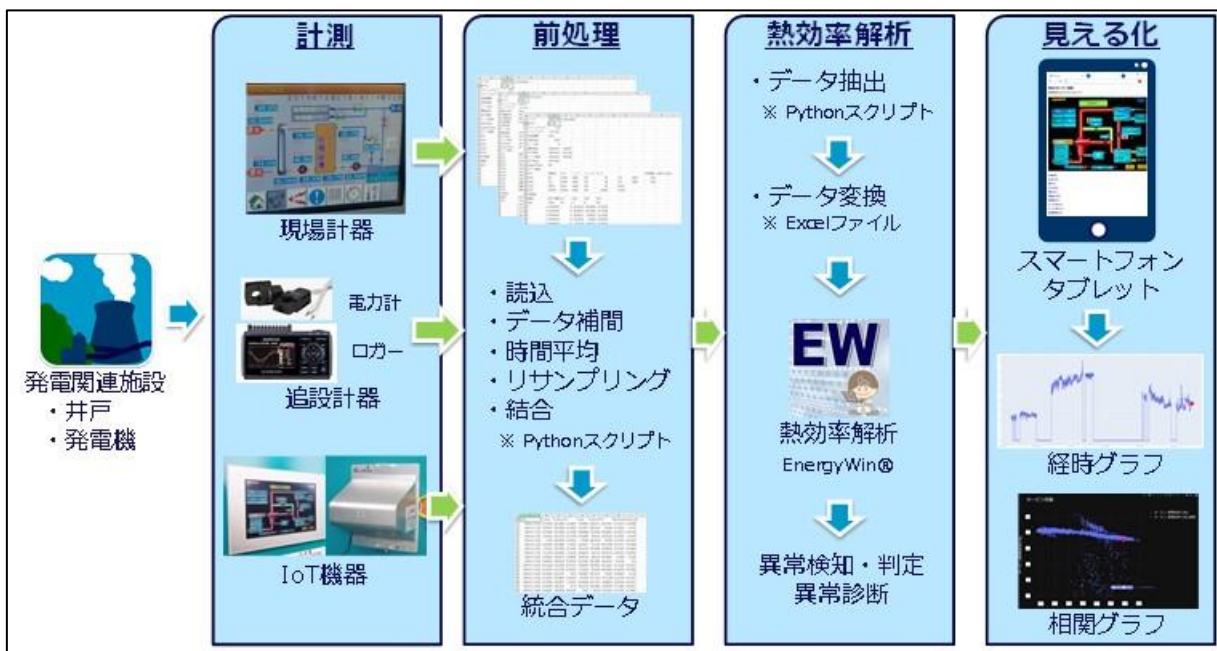
可能とする実証試験設備にカスタマイズした運転管理支援ツールを作成する。

過去に生じたトラブル事例(母数は調査結果に依る)を対象にして、トラブル発生前の運転データを基本ツール(研究開発項目④にて作成)に読み込み、対象とするトラブル事例の20%以上において異常予兆検知が可能であることを確認する。

1) 運転管理支援ツールの開発(担当:電力中央研究所)

発電関連設備の各機器性能や各配管部の状態量を遠隔監視(見える化)するため、運転データに基づく設備全体の性能解析・評価をリアルタイムに実施可能な「運転管理支援ツール(以下、管理ツール)」を開発し、小規模地熱発電所2地点を対象に実証試験を実施した。なお、熱利用施設については、「事業全体」に記したように、本研究開発項目の対象外とした。

管理ツールは、対象設備全体の熱効率解析を実施することにより、要素機器から各配管に至る設備状態を容易に把握し、遠隔監視(見える化)することができる。管理ツールを活用することで、設備状態の解析にかかる労力を大幅に削減することができるだけでなく、井戸や大気条件の影響を加味した上で、対象設備の健全性を要素機器や各配管単位で診断することが可能となる。図III-6に、管理ツールの概略図を示す。管理ツールは、「計測」から「前処理」、「熱効率解析」そして「見える化」までの一連のプロセスを自動かつリアルタイムに実行することができる。



図III-6 運転管理支援ツール(管理ツール)の概略図

本事業では、運転管理支援ツールの開発および実証試験の対象設備として、発電機メーカーや出力が異なり、また、近年の設備の暦日利用率が比較的低いという理由から、シン・エナジー株式会社が保有する「小浜温泉バイナリー発電所」および協和地建コンサルタント株式会社が保有する「協和地建コンサルタント湯梨浜地熱発電所」を選定した。

小浜温泉バイナリー発電所を対象に、電力中央研究所が開発した熱効率解析ソフト EnergyWin®を用いて、要素機器の性能および配管内作動流体の状態量を見える化する管理ツールを開発し、2019年10月より実証試験を開始した。本ツールを用いてバイナリー発電機の設備性能を正常時の性能値と比較したところ、2019年11月以降の発電機出力の低下が異常値であることを検知した。さらに、2020年1月にバイナリー発電機を構成する蒸発器の性能低下を検知し、発電機出力の低下の一因であることを明らかにした。また、本事例では、管理ツールの適用によって暦日利用率が絶対値で10%以上(62.4%→73.8%)向上した。本事例は、向上効果が特に大きいトラブルであったと考えられるが、本事業の最終目標である「相対値で10%以上」を大きく上回る結果であり、管理ツールが発電関連設備の異常診断に有用であることが分かった。

湯梨浜地熱発電所を対象に、現地設備のモニタ画面でしか確認できない運転データについても見える化するため、モニタ画面および現場計器より運転データを数値情報として読み取り収集するIoT機器を作製するとともに、IoT機器と連携した同発電所専用の管理ツールを開発した。そして、2020年4月より実証試験を開始し、各種運転データを通年で安定的に収集し、リアルタイムに設備全体の熱効率解析が実行できることを確認した。

以上のように、開発した運転管理支援ツールを実際の発電所に適用し、発電所の設備運転状態の監視と設備性能の異常診断の両面において、高い実用性、有用性を実証した。

現在、第一実業株式会社のバイナリー発電機は小規模の地熱・温泉での発電やバイオマス発電、焼却設備での排熱発電向けに65台の納入実績があり、さらに受注済み、製作中の発電機が21台ある。また、株式会社IHI製のバイナリー発電機は、2013年に販売開始以来、温泉熱・バイオガスコジェネ・ゴミ焼却炉向けに約70基の納入実績がある。これらバイナリー発電機の維持管理に、本事業にて開発した管理ツールが導入されることを期待する。

管理ツールを導入すると、これまで不足していた、年間の季節変動に応じた正常状態における各要素機器性能値(≒機械学習における教師データ)を蓄積できるようになる。今後は、主要な補機(温水ポンプ、冷却水ポンプ、冷却塔ファンなど)の最適な制御値(周波数)の組合せを提案するAI技術の開発などにも、管理ツールによって得られるこれら解析結果が活用されることを強く期待する。

2) 異常予兆検知(担当: エンジニアリング協会)

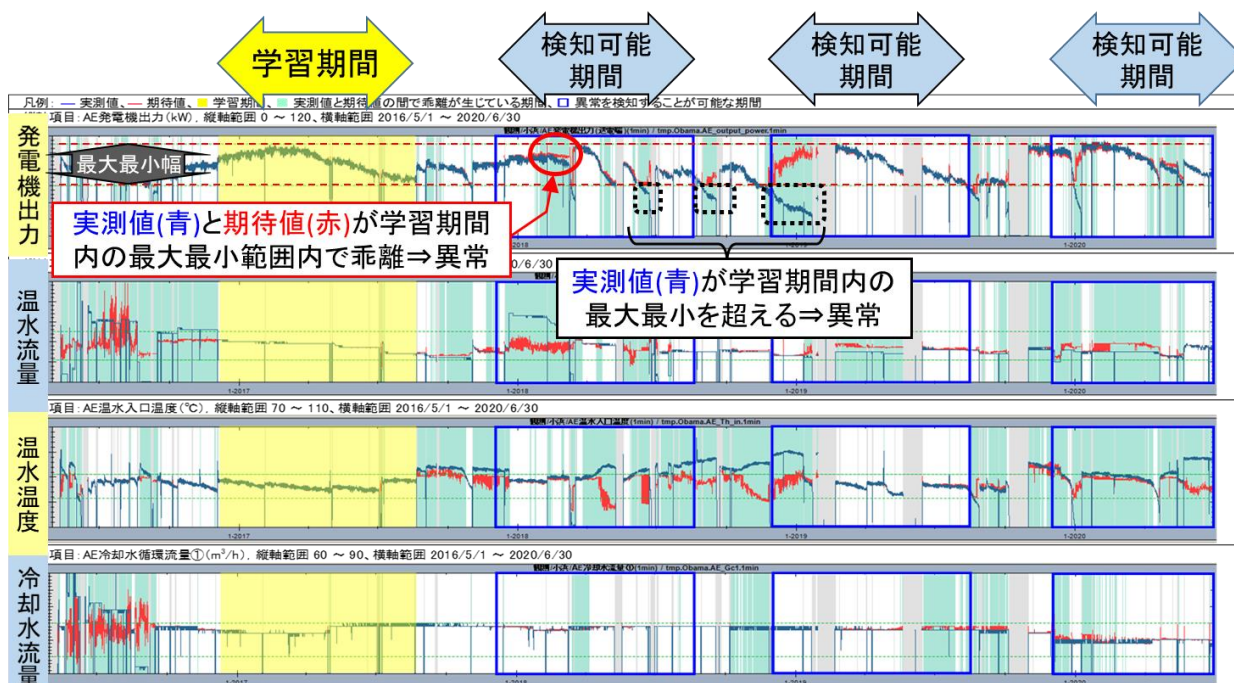
本事業では、地熱発電所におけるトラブル発生率の低減を目的としており、その手段としてAIを適用した異常予兆検知の適用性を検討した。異常予兆検知では、正常な運転状態におけるデータを使って学習させた予測モデルにより運転データの期待値を計算し、実測値との乖離量で異常を判定する。そのためには、学習データとして設定する正常運転期間をどこに設定するかが重要となる。

本検討では、複数の発電所における運転データの時系列データの分析を行い、その結果から、学習期間の選定方法と異常を検知することが可能な期間について、表Ⅲ-1に示す3つの解析ケースを想定した。ただし、ケースAに該当するデータは結果的に存在しなかった。

表Ⅲ-1 学習期間の選定方法と異常を検知することが可能な期間

解析ケース	学習期間	異常を検知することが可能な期間	備考
A	正常な運転状態を1年間設定可能	季節変動が考慮できているため、年間を通してどの期間でも異常を検知することが可能である。	発電所の運転条件が変更になった際には、学習期間を再選定する必要がある。
B	正常な運転状態を年間の一時期のみ設定可能	季節変動を考慮した学習ができないことから、異なる年の同時期のみが異常検知の対象となる。	学習期間が短いため、異常を検知することが可能な期間が限定的となる。
C	正常な運転状態を1か月程度設定可能	季節変動を考慮せず、学習期間の少し先までが異常検知の対象となる。	季節変動を考慮できていないため、学習期間の再学習が短い頻度で必要となる。

ケース B とケース C の学習期間の選定方法に基づき、5 か所の小規模地熱発電所における解析を実施した。図Ⅲ-7 にケース B の解析結果の一例を示す。



図Ⅲ-7 異常予兆検知の解析事例

複数の小規模地熱発電所における各種データに機械学習を利用した異常予兆検知ソフトを用いた解析を適用した結果、①計測データの不備、②発電機の手動操作や自動制御への対処、③発電機停止の要因や期間等の記録不備、④客観性のある学習期間の設定と異常値除去、⑤AIを適用することにより検知できる異常は限定的、等の課題を抽出した。

計測データについては、計測間隔の粗さ等に関する課題があり、発電事業者による手動操作の記録が残っていないことや発電機内部の自動制御の内容がブラックボックスであることに起因するデータ解析上の課題もあった。トラブル要因等の情報が得られない場合には、学習期間を機械的に設定することは困難であり、主観的な判断が入らざるを得ない。また、設定した学習期間内に存在する異常データを客観的な判断基準に基づい

て除去することも難しい。

図に示すように、異常値を除去した学習期間内の最大と最小の範囲を超えることにより異常と判定される計測データも多い。AIを適用することによって検出可能な異常値は、最大と最小の範囲内で実測値と期待値が乖離したデータであり、異常と判定されたデータの一部であることを認識しておく必要がある。

今後、AIを利用した異常予兆検知ソフトが保有する機能を有効に活用するには、例えばEnergyWin®などの物理モデルによる性能解析を事前に行い、発電機の基本性能に基づく正常な運転状態における計測値の変動を把握した上で、物理的に意味のある変動指標を導き出し、その指標に対してAIによる異常予兆検知機能を適用するようなシステムが必要になると考えられる。

3) 異常予兆検知によるトラブル発生率の低減 (担当：エンジニアリング協会)

本事業の目的であるトラブル発生率の低減率を算出するための指標について検討した結果、「事前に予兆検知可能なトラブルは、何らかの措置を行うことによりトラブル発生を予防可能」という前提条件を置くこととした。この場合、トラブル発生率の低減率は、「予兆検知可能なトラブルの件数」/「トラブルの総件数」となる。本事業では、異常予兆検知のために使用したPredict-It™を用いた複数の試行解析から、事前に予兆検知できたトラブル事象を抽出し、その事象の件数を実際に発生したトラブル事象の総件数で割った値を「トラブル発生率の低減率」と定義した。

実証試験サイトとして選定した小浜温泉バイナリー発電所と協和地建コンサルタント湯梨浜地熱発電所におけるトラブル事象の分析結果から、それぞれの発電所における「①予兆検知できる可能性のあるすべてのトラブル事象」と「②Predict-It™による試行解析から異常予兆検知できる可能性が示されたトラブル事象」の件数を抽出した結果は以下のようになる。

- ・小浜温泉バイナリー発電所：①の事象7件、②の事象2件
- ・湯梨浜地熱発電所：①の事象6件、②の事象1件

以上より、2発電所における平均的なトラブル発生率の低減率は、 $(2+1) / (7+6) = 0.23 = 23[\%]$ となる。

5. 研究開発項目④「IoT-AI システム化」

【事業概要】

研究開発項目①～③のIoT-AIでの研究成果とのインターフェース開発を行う。2019年度までにプロトタイプを製作し、2020年度の実証試験を通して、本事業終了後のエネルギーマネージメントプラットフォームの実用化を目指す。

【事業目標】

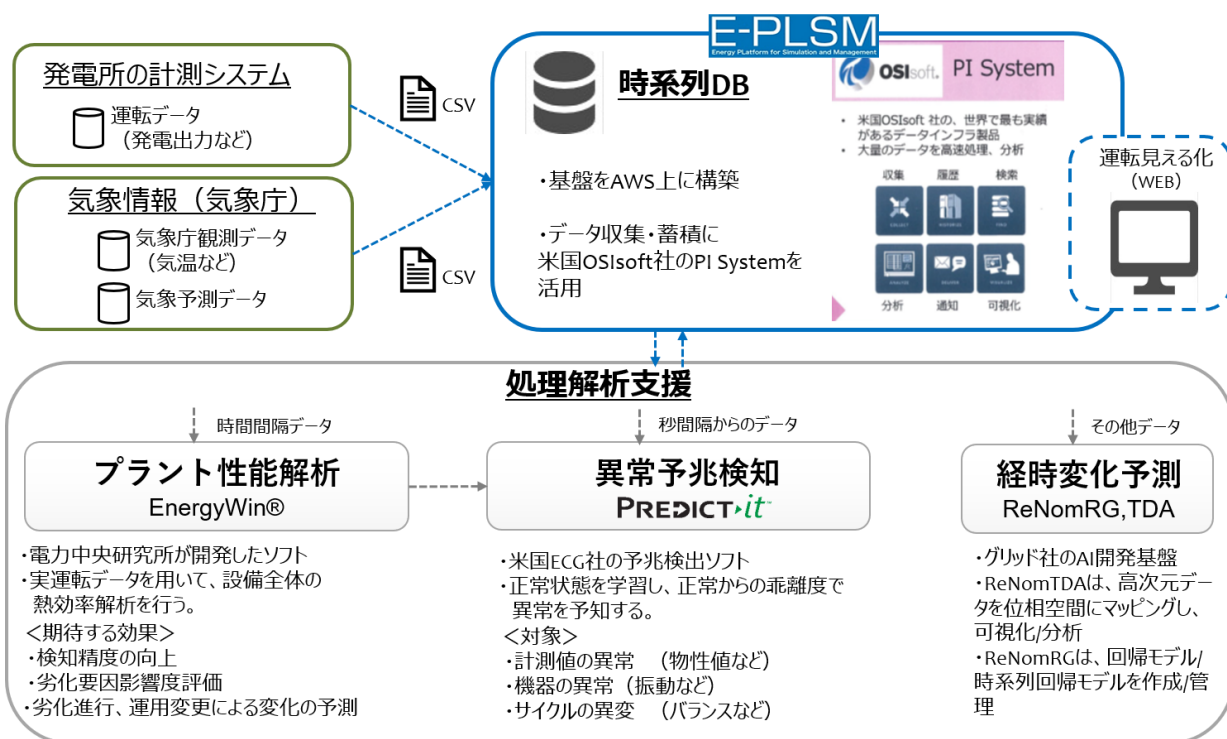
エネルギーマネージメントプラットフォーム(EMP)のプロトタイプとして、EnergyWin®、Predict-It™あるいはReNom®を効果的に活用したツール(基本ツール)とE-PLSMとの相互インターフェースを作成し、システム化による効率低下が発生していないことを確認する。

1) EMP プロトタイプ構築およびデータ登録（担当：伊藤忠テクノソリューションズ）

近年の発電設備においては、EMPを活用したIoT-AI化が促進されている。しかし、小規模地熱発電においては、必ずしもEMPの活用が進んでいるわけではない。

本研究開発では、アマゾンウェブサービス社のクラウドサービス（AWS）および、伊藤忠テクノソリューションズ株式会社のエネルギー統合型クラウドサービス（E-PLSM）をベースにEMPプロトタイプを構築した。本EMPプロトタイプのデータ処理解析支援環境として、電力中央研究所が開発した熱効率解析ソフト（EnergyWin®）、米国ベンチャーECG社が開発した異常予兆検知ソフト（Predict-It™）、国内AIベンチャー株式会社グリッドが開発したAIツール（ReNom®）の相互インターフェースを作成し用いた（図Ⅲ-8）。

構築したEMPプロトタイプには、検証を行うため10事業者から受領した500項目に及ぶデータおよび気象庁が観測している気象データを登録した。



図Ⅲ-8 EMPプロトタイプで用いた解析支援ツール概要

2) EMP プロトタイプの AI ツールの検証（担当：伊藤忠テクノソリューションズ）

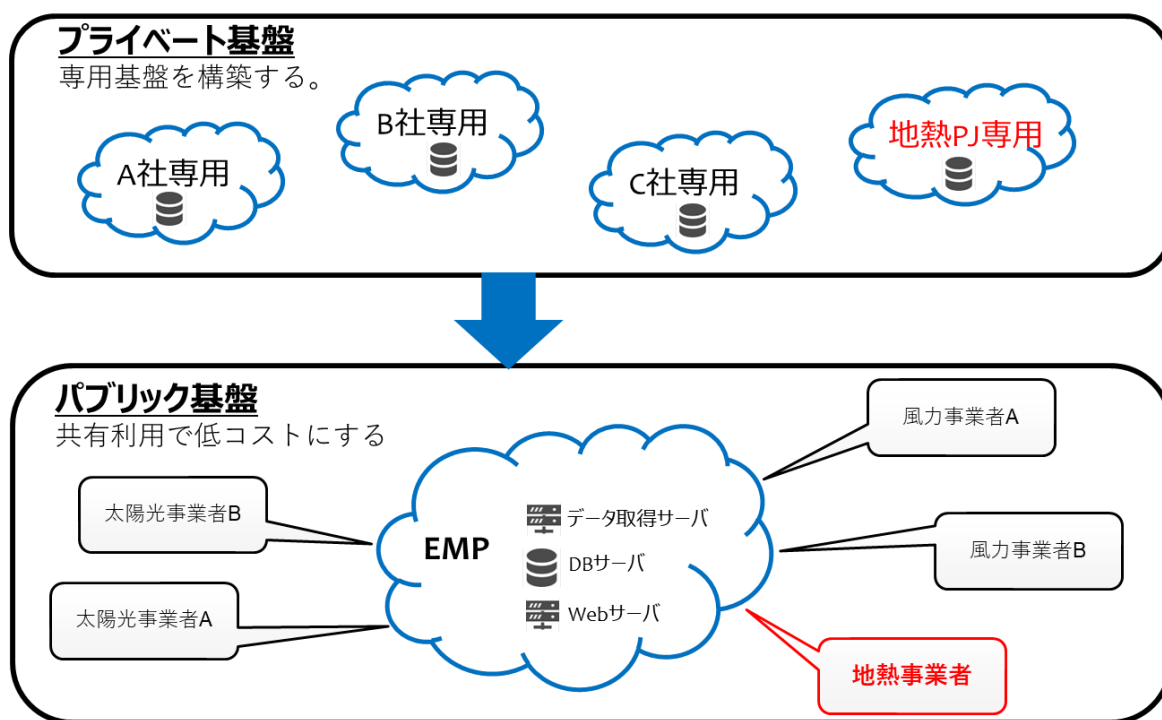
構築したプロトタイプを用いて上述の異常予兆検知の検証に加えてAIツール（ReNom®等）を用いた検証を実施した。実施したいくつかの解析結果の中でスケールモニタリングに用いられる配管外表面熱流束値を高価な熱流束センサを用いることなく配管表面温度、周囲温度および風速からAIモデルを構築して予測することが出来た。今後、高価な熱流束センサを用いることなくスケールモニタリングを実施する可能性を示せたと考える。

3) EMP プロトタイプの課題（担当：伊藤忠テクノソリューションズ）

検証を通して効果的なデータ収集による円滑な可視化、解析の効率改善の有効性を確

認した一方、今まで EMP が活用されていないこともあり、既存データや有効な知見が少なく、データ項目が整理されていないなど EMP を効果的に活用する上での課題点が数多くあった。

特に小規模地熱スマート発電&熱供給施設においては収入に限られるため、EMP を低価格で利用する必要がある、そのためには図Ⅲ-9 で示されるような共同利用の環境を整備する必要があると考えられる。



図Ⅲ-9 EMP 利用イメージ図

6. 最終目標に対する成果と達成度

研究開発項目	最終目標 (2021年5月)	成果	達成度
① 既存井戸の評価・モニタリング	研究開発項目④にて開発した基本ツールを用いて井戸の健全性と配管のスケール特性を評価・実証する。	<ul style="list-style-type: none"> ➢ 2 か所の小規模地熱発電所において、生産井の健全性を評価し、生産井の状態に起因した発電異常がないことを明らかにした。 ➢ 2 か所の小規模地熱発電所の地熱流体輸送配管にIoT機器を設置し、配管内におけるスケール成長の将来予測が可能であることを実証した。 	○

②事業性評価・運営	既設事業の事業コストやリードタイムを対象にして地域経済効果と事業プロセスを可視化し、研究開発項目①～③に係る設備投資を抑えつつ、社会コスト低減の最適化を図る。	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 収益改善に関して、事業利益を最大化する為に、点検・修理に係る運営計画について、事業者自らが簡便にシミュレーションできる「事業性評価支援ツール」を開発した。 	○
③運転管理	発電関連設備・熱利用施設の計測データの見える化及び、各設備の性能解析・評価を可能とする運転管理支援ツールを作成するとともに、過去に生じたトラブル事例を対象にして、20%以上において異常予兆検知が可能であることを確認する。	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 発電関連設備の各機器性能や各配管部の状態量が見える化し、運転データに基づく設備全体の熱効率解析をリアルタイムに実施可能な「運転管理支援ツール」を開発。小規模地熱発電所 2 地点に対し高い実用性、有用性を実証した。 ▶ 異常予兆検知ソフト (Predict-It™) による学習期間の設定方法と異常予兆検知の適用性を検討するための複数の事例解析を実施した。実証試験を実施した 2 発電所のデータに対して異常予兆検知ソフトを適用した結果、予兆検知可能なトラブル事象の件数は実際に発生したトラブル事象の総件数の 20%以上と試算された。 	○
④IoT-AI システム化	EMP のプロトタイプとして、EnergyWin®、Predict-IT™あるいはReNomを効果的に活用したツール（基本ツール）と E-PLSM との相互インターフェースを作成し、システム化による効率低下が発生していないことを確認する。	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 研究開発項目①～③を包含したエネルギーマネジメントプラットフォーム (EMP) プロトタイプを構築した。 ▶ データに整理・登録・検証を通じて、小規模地熱発電所における EMP の課題点やあるべき姿に関して整理した。 ▶ AI を適用した地熱発電に関わる計測データ等の予測解析を実施し、発電量、スケール厚さ、異常予兆等の予測において適用可能な事例を示した。 	○

⑤全体の目標	<p>研究開発項目①～④の定量的目標数値を維持し、対象とするトラブル事例の20%以上において異常予兆検知が可能であることを確認することにより、『トラブル発生率20%低減』が達成できることを実証試験により確認する。トラブル回避及び発電関連設備・熱利用施設の運用改善による各施設の利用率を試算し、本ツール適用前より『利用率10%向上』することを実証試験により確認する。</p>	<p>▶ 実証試験を実施した2発電所のデータに対して異常予兆検知ソフトを適用した結果、予兆検知可能なトラブル事象の件数は実際に発生したトラブル事象の総件数の20%以上と試算された。</p> <p>▶ 開発した運転管理支援ツールを小規模地熱発電所に適用した結果、蒸発器の異常診断を受けて修繕を早期に実施することで、暦日利用率の10%以上の向上が見込まれることを明らかとした。</p>	○
--------	--	--	---

IV. 事業化へ向けての見通しと取組みについて

1) IoT-AI システム (EMP) (担当：伊藤忠テクノソリューションズ)

小規模発電事業者にとっては、運用コストが限られていることからEMPの単独運用ではコストメリットが得られず、導入は難しいことが認識された。また、小規模地熱発電所を複数集めたとしても、十分なスケールメリットを得ることは難しいため、様々な再エネ事業者のシステムと統合した大きな枠の仕組みづくりが必要であり、事業化には様々な課題が見えた。

今後、様々な再エネ事業者のデータを収集して一元管理し、データの利活用を推進する仕組み作りを行うことができれば、発電事業者の実質的なEMP利用コストの低減およびEMP利用促進につながることを期待できる。多数の発電事業者、メーカーの計測データや処理・解析知見を知識データベース化することにより、国内の小規模地熱全体の効率・利用率の改善に繋がっていくと考える。

2) スケールモニタリング (担当：東京海洋大学)

導入方法：源泉輸送配管へのセンサ施工、遠隔監視IoT機器・解析装置の設置。

試験提供：当面は個別の要望に対し、受託研究の一環あるいは受託業務として本モニタリング技術と分析サービスを提供する。

事業化の課題：事業化による本技術の導入促進には、より安価で汎用性の高いセンシング技術とユーザーインターフェースの開発、製品化が必須となる。大学独自でこれらを達成することは難しく、メーカー等の協力が必要になるが、事業対象を地熱発電のみとした場合、需要が少ないことから事業化に賛同する企業を募ることは困難と考える。

今後の方向性：配管詰まり検出技術のニーズとビジネスの潜在性が高い例えば石油・ガスパイプラインフローアシュアランス分野等の他分野も対象として、関連するコンサル企業や計測機器メーカーとの共同研究開発等を幅広く展開することで本技術の製品化、事業化を推進し、ひいては地熱分野への導入促進に結び付けていきたい。

3) 運転管理支援ツール【GeoShink™】（担当：電力中央研究所）

導入方法：発電所の現場計器付近に、遠隔監視 IoT 機器を設置

提供方法・費用：調整中（月額費用を抑えたサブスクリプション契約とする予定）

試験提供：GeoShink™ は今後、さらなる高機能化などの改良を進める予定であり、本改良にご協力いただける事業者様にはモニタ価格での提供を検討中

4) 事業性評価支援ツール（担当：電力中央研究所・エンジニアリング協会）

公開方法：完成版をエンジニアリング協会のホームページで無料公開予定

普及活動：エンジニアリング協会が定期開催している「地熱発電・熱水活用研究会」などの機会を活用してセミナーを開催予定

個別テーマ (2.8)

(2) 地熱発電所の利用率向上に関する研究

(2.8) 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

助成先：東芝エネルギーシステムズ株式会社

II. 研究開発マネジメントについて (事業の計画内容)

(2.8.1) 事業の概要

再生可能エネルギーに位置付けられる地熱発電は今後大きな新設需要が見込まれる。一方で風力発電や太陽光発電といった他の再生可能エネルギー電源のコストが下がり、競争環境が激化している。従って地熱発電事業者はより効率的な発電所運営が求められる。また弊社の独自調査によれば、地熱発電事業者のニーズは特に予兆診断(Predictive Maintenance)にあることがわかった。燃料代がかからず、発電量が井戸から供給される蒸気に依存する地熱発電においては、如何に止めずに運転するか、稼働率を如何に高く保つかということに特に関心が高いことがわかった。

そこで本研究では、発電所の稼働率向上に寄与する IoT/AI を含んだシステムの技術開発を行うために、次の開発目標を設定した。

- i. 対象発電所の稼働率のベースラインを検証し、稼働率に影響するトラブル因子について整理する。
- ii. i. で評価されたトラブルの発生率を 20%低減することを、目標とする。 目標に対するアプローチは 2 つあり、1 つはトラブルについて IoT/AI 技術の適用により予知・予見できるシステムの構築を目指す。もう 1 つは対象発電所のエンジニアリングデータを利用したプラントモデル (デジタルツイン) を構築し、IoT/AI 技術の適用により、オンラインデータによる実プラントの性能値とプラントモデルの性能値をリアルタイムで比較し、スケール堆積等の地熱発電所特有のファクターも含めた経年劣化による性能への影響を監視ならびに分析するシステム開発を目指す。そのうえで、実証期間中に可能な範囲でトラブル予兆を行い、またプラント性能の状態をリアルタイムで監視し、設備毎の経年劣化まで分析することで、i. のベースラインに対する稼働率向上の検証を行う。

発電所の稼働率向上に寄与する技術開発として、稼働率に影響するトラブル因子の一つであるタービンへのスケール付着を抑制する薬剤を、ラボベースで検証する。この結果から、薬剤によりタービンスケールの付着を 20%抑制することを目標とする。 具体的には実地熱蒸気を使用し、経年的なタービンスケールの付着を薬剤注入とタービンスプレーを組み合わせたシステムで抑制するシステムの構築を目指す。

図Ⅱ-1に研究開発の概略図を示す。



図Ⅱ-1 研究開発概略図

(2.8.2) 研究開発の計画

(1) 予兆診断による稼働率向上

地熱発電所の運用中に発生するさまざまな問題は、その事象が起こってから対処しているのが実態であり、事象を確認している時や対策検討の期間中はプラントが稼働しないため、地熱エネルギーの有効活用ができない。そこで地熱エネルギーを最大限活用するためには、問題が発生する前に予見する必要がある。

そこで、問題が発生する前に予見可能なビックデータ解析ツールを開発する。具体的には、過去のプロセスデータ（地下から供給される蒸気の条件、大気温度などの発電所の境界条件とプラント熱収支など）の評価を通じて、現在のプロセスデータのあるべき範囲を予測できるようにし、実際の運転値がこれと乖離した場合は、異常の可能性のある値と捉え抽出する。また、抽出されたプロセスデータと関連性が高い別のプロセスデータも抽出する。弊社はこれらのデータから実機で起こっている物理現象を推測し、稼働率を低下しうるトラブルに繋がる要素を導き出すことができるシステムを開発する。その後、実証試験先の A 発電所と B 発電所に実装し、運転データの分析と評価を行う。当該システムを開発するため、以下の研究開発を実施する。

【2018 年度】

対象発電所において、過去に起こったトラブル及びトラブルに係るプロセスデータを取得し、過去に起こったトラブルに対してそれ以前のデータからトラブルの予兆を検知できるか評価を試みる。また、分析ツールを発電所現場に実装し、実機の運転モニタリングための準備を行う。

【2019 年度】

2018 年度の評価結果に基づき、将来の故障の予兆診断システムを構築する。構築したシステムの実証を行うため、実機に適用し運用を行う。実証試験の結果を踏まえ、必要に応じてシステムの拡充・改善を行う。

また対象発電所のエンジニアリングデータを利用したプラントモデル（デジタルツイン）を構築し、システムのオフライン検証を行う。その後、システムを実機に適用し、オンラインによる運用を行う。実証試験の結果を踏まえ、必要に応じてシステムの拡充・改善を行う。

【2020 年度】

2019 年度に引き続き、予兆診断システムの実機を用いた実証試験を行う。予兆診断システムを適用した場合と適用しない場合を比較し、システム導入による効果を評価する。

(2) スケール抑制対策による利用率向上

地熱発電においてタービンスケールは、タービン機器の稼働率や寿命に影響するものとして、発電事業者を悩ませる大きな問題となっており、弊社の調査からも発電事業者の関心が高いことがわかっている。これに対し、タービン内部のスケールに対しては、タービンウォッシングスプレーという解決策が存在する。これは、主蒸気の中にミストを散布し、湿り度を上げた状態でタービンへ導くというものである。しかし水を用いたタービンウォッシングスプレーは、効果のある場合もあれば効果の無い場合もあり、そのみで根本的な解決に足るものにはなっていない。タービンウォッシングスプレーの効果が機場ごとにばらつきがある要因としては、蒸気の性状が井戸ごとに異なり、各井戸に含まれるスケール原因物質の種類と濃度に差異があるため、スケールの化学組成が機場により異なることが挙げられる。

この対策として、本テーマではタービン内のスケール付着を抑制することを目的に、スプレーを行う媒体に薬剤を加えることでスケールが付着しにくくなるシステムを開発する。その後、実証試験先の A 発電所に設置し、実証試験を行い、スケール抑制の効果を検証する。また、

(1) 予兆診断による稼働率向上」にて開発するプラント運転状態の変化を逐次モニタリ

ング可能なシステムを利用し、既設発電所の各種センサーからスケール付着量を予測するスケール可視化ツールを開発する。

【2018年度】

実地熱蒸気の性状と実際に付着したスケールの性状を分析し、化学計算等を用いてスケール生成のメカニズムを探ることで、蒸気の性状から生成されるスケール組成の予測を行う。またウォッシングスプレーの効果のばらつきについて考察する。また、薬剤の効果を検証するため、実試験の事前段階として、簡易的な模擬試験装置を作製し、ラボレベルで薬剤の効果検証と選定を行う。スケール可視化ツールについては、対象発電所のプロセスデータとプラント運転データを分析し、傾向や運転状況を評価し、タービン入口における蒸気通過体積流量からタービンスケール付着量の算出アルゴリズムを検討・構築する。

【2019年度】

2018年度に引き続き実試験の事前段階としての薬剤の効果検証をラボの簡易試験装置を用いて行う。入口条件に応じて必要な薬剤量が異なることが予想されるため、入口条件を振ったスケール付着試験と付着抑制メカニズムについての検討を行う。実現場での試験実施のための準備として現地調査および具体的な設置場所の検討を行う。試験と実機の環境を近づける設備検討、試験で使用できる蒸気量など現地の制限に応じた設備検討を行う。その上で、試験要領策定、試験装置仕様決定、設計・製作を行う。スケール可視化ツールについては2018年度に引き続き、タービンスケール付着量を算出するアルゴリズムについて検討・構築を行う。またタービンスケールによる発電量低下とタービン開放点検費用等を評価し、スケール除去の時期を提示するタービンスケールの将来予測アルゴリズムを検討・構築する。

【2020年度】

2019年度に引き続き試験装置の設計・製作を行い、製作した実証試験装置を実現場に設置し、実証試験を行い効果検証する。具体的には、主蒸気配管から分岐した実地熱蒸気に試験片を曝露し、薬剤を噴霧し、スケール付着抑制の効果を評価する試験を実施する。実証終了後試験装置は実現場で継続使用しない場合は、現状復帰する必要があるため撤去する。またスケール可視化ツールについては2018年度、2019年度に検討した、タービンスケール付着量の算出アルゴリズムとタービンスケールの将来予測アルゴリズムを組合わせたスケール可視化ツールの妥当性について、タービン開放定期点検開始日の実績日と計算結果を比較し、評価を行う。

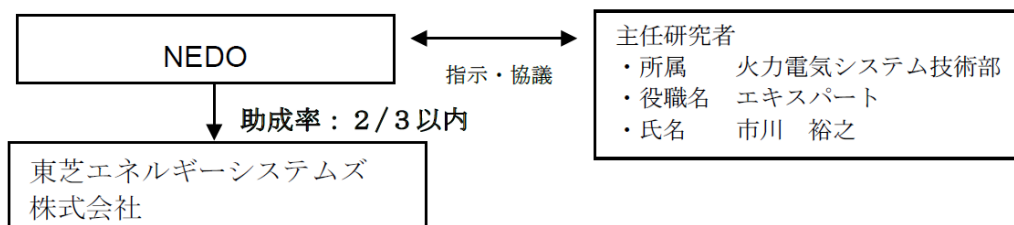
(2.8.3) 事業スケジュール

本事業の研究期間は、2018年8月1日より2021年2月28日であり、主な事業スケジュールを下表に示す。

日 程 表

	2018年度			2019年度				2020年度			
	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. トラブル発生率を低減させる予兆診断の研究											
ビックデータ分析ツールの実装運営											→
過去のトラブルの分析			→				→				
プラント性能監視システムの実装運営											→
運転データの分析・評価											→
2. 地熱タービンスケール対策技術の開発											
薬剤効果の事前検証											→
実証試験											→

(2.8.4) 研究開発の実施体制



III. 研究開発成果／事業化へ向けての見通しと取組みについて

(3.1) 予兆診断による稼働率向上

予兆診断によるトラブルの発生率を20%低減することを目標とし、過去トラブルの分析、予兆診断システムによる検証、予兆診断システム導入によるトラブル抑制効果分析、性能評価システムによる検証を実施し、下記結論を得た。

(1) 過去トラブルの分析

社内管理システムの全世界の地熱トラブル事例48件の予兆診断可否について評価を行い、条件付き（既設発電所へのセンサー追加など）を含め20件は予兆診断可能であると判断し、予兆診断を可能とするプロセスデータの選定に資した。またA発電所より入手したトラブル事例のうち、タービントリップといった重大事故につながる事例9件を抽出し予兆診断可否を検討したところ、条件付きを含め9件全てで予兆検知可能であると判断し、タービン付帯設備のトラブルに起因する設備診断アセットの構築の詳細検討に繋ぐことができた。またB発電所についても入手したトラブル事例9件のうち、3件は予兆診断可能であると判断し、A発電所と同様に設備診断アセットの構築の詳細検討に繋げることができた。

(2) 予兆診断システムによる検証

A/B発電所向けに設備診断アセットをそれぞれ7アセット、23アセット開発した。設備診断アセットの教師データの登録期間は過去1年間とし、加えて季節による変動を考慮したチューニングを行った。その後、設備診断アセットをA/B発電所に設置した予兆診断システムに実装し、それぞれ実証試験を行った。実証試験中はリモート接続による予兆診断システムの遠隔監視を可能とし、また予兆を検知した場合に関係者にメールが送付される機能を実装した。実証試験の結果、地熱向けに設備診断アセットの監視幅のしきい値算出方法を検討する必要があることが分かった。火力との条件の違いから地熱では正常データを10分割にクラスタ化し、クラスタ毎にしきい値を算出して、各クラスタのしき

い値の平均値を採用することとした。これにより、地熱のような正常運転時においても蒸気状態などの変動が大きい監視点に対し、適切な監視幅を設定することができ、地熱向けの手法を確立した。これを設備診断アセットに適用し予兆診断システムに実装することで、従来の火力の手法では予兆検知および異常検知できなかった事象を検知することに成功した。

(3) 予兆診断システム導入によるトラブル抑制効果分析

地熱発電所向けに構築した設備診断アセットを過去のトラブル事例に適用し、トラブルの抑制効果を評価した。表に示すとおり、9件中4件は予兆検知可能であることが分かり、20%以上のトラブル発生率を抑制できることが確認できた。表中の異常検知可は、トラブル発生日とはほぼ同時刻に検知できたことを示し、予兆検知可はトラブル発生前に、過去の正常運転時とは異なる傾向を検知できたことを示す。以下に対象の件名と予兆検知可能と判断した理由を示す。

地熱向け設備診断アセットを過去のトラブル事例に適用した結果、9件中4件は予兆検知可能であることが分かり、20%以上のトラブル発生率を抑制できることを確認し目標値を達成した。

表Ⅲ-1 A 発電所における過去トラブル事例の評価一覧

* 評価結果 ○：予兆検知可、△：異常検知可、×：検知不可

No.	発生日	件名	評価結果*	予兆検知時間
1	2014/5/24	蒸気井 圧力低下	△	約10時間前
2	2014/6/27	タービン振動異常	○	約8日前
3	2014/4/30	蒸気井 蒸気温度低下	○	約23日前
4	2015/7/29	タービン振動異常	○	約12日前
5	2016/8/1	発電機界磁地絡によるトリップ	×	—
6	2016/12/1	蒸気溜圧力低下	×	—
7	2018/4/4	GCPガス調節弁・出口ガス流量ハンチング発生	△	(評価継続中)
8	2018/5/1	復水器水位調節弁開度指示不具合	△	約5時間前
9	2018/7/2	沈砂池水位計不具合	○	約1日前

(4) 性能評価システムによる検証

A/B 発電所向けにエンジニアリングデータをベースとしたプラントモデル（デジタルツイン）と監視画面を作成し、性能の経年劣化をリアルタイムに評価可能なシステムを開発

し、実証試験を行った。その結果、実証試験期間中に A 発電所では 2020 年 7 月に定期点検、B 発電所では 2020 年 12 月に生産井設備改良工事がそれぞれ行われたため、経年劣化の影響を評価することができなかった。

(3.2) スケール対策による利用率向上

実蒸気に薬液添加することにより、タービンへのスケール付着抑制 20%を目標とし、薬液検討、実証試験、スケール分析を実施し、下記結論を得た。

(1) 薬液検討

実蒸気の薬液を噴霧するアプローチを選択するにあたり、タービンへの影響及び環境影響を考慮し、分散剤として使用される高分子化合物 PVP に着目した。PVP はいくつか重合度の異なる薬剤があり特性が異なるため、模擬蒸気と薬液からなる混合液の滴下試験とスプレーノズルの噴霧試験から、スケール付着抑制効果の最も高く実証試験に適用可能な PVP (K-25) を選定した。

(2) 実証試験

模擬蒸気の凝縮水を用いたラボ試験にて選定した PVP (K-25) の実蒸気への薬液効果を確認するため、A 発電所にて検証試験を実施した。実施にあたり、タービン翼 2-3 段目の湿り蒸気条件(31kPa、70℃)を模擬する試験装置を試作した。試験は薬液無し、0.001%、0.01%、1%濃度の薬液注入条件でそれぞれ約 1 週間の試験片への曝露を実施し、試験片へのスケール付着物重量測定より薬液効果の有無を確認した。

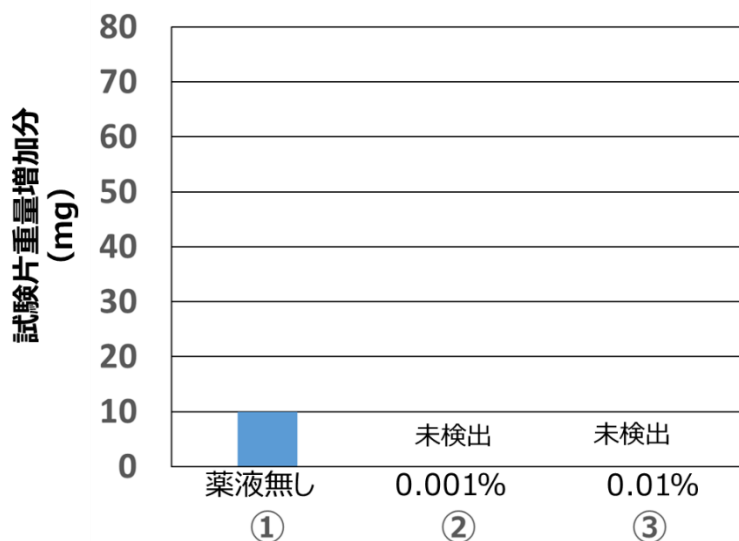
下表に各試験の試験条件を示す。試験では、薬液効果の確認として薬液無しの試験も実施することとした。

表Ⅲ-2 A 発電所にて実施した試験リスト

試験番号	薬液濃度	設定薬液量	設定蒸気量	試験時間
①	薬液無し	0kg/h	30kg/h	163h (9/28 17:30 ~10/6 9:30)
②	0.001%	1.5kg/h	30kg/h	163h (10/24 15:40 ~10/31 13:45)
③	0.01%	1.5kg/h	30kg/h	163h (10/6 16:30 ~10/13 14:20)

分析結果より、薬液濃度 0.001%と 0.01%では付着物重量は測定限界以下となり、20%以上の薬液効果を確認し目標値を達成した。今回、薬液濃度が最小の 0.001%でも効果が認められたが、さらに濃度を下げても薬液効果が期待できると考えられる。したがっ

て、経済的及び環境的な観点から 0.001%以下の濃度での最適化が今後の課題である。



図Ⅲ-1 試験片重量増加分の結果

(3) スケール分析

試験片先端から 5mm、50mm、105mm の領域に付着したスケールの成分分析を実施した。スケールの元素成分 A, B が検出されており、薬液濃度と比例し元素成分 A, B の付着抑制率は向上する傾向にあった。また、注入した薬液成分も同定しており薬液による効果であることを確認した。これらの元素は実蒸気分析にて観測されていたものの、試験期間が短いため事前予想していた Si 等の成分の付着が観測されなかった。1 週間以上の長期試験を実施し、他の元素や化合物の付着の有無を検証するのが今後の課題となる。

表Ⅲ-3 元素成分抑制率

薬剤濃度	抑制率	
	成分A	成分B
0.001%	28.4%	57.6%
0.01%	62.9%	65.4%

(4) スケール可視化

地熱発電所の利用率向上に向けて、地熱特有のタービンスケールの付着に着目し、スケール量算出アルゴリズムと将来予測アルゴリズムから構成されるスケール可視化システムを検討した。既設発電所の計測点からスケール付着量を定性的に算出するアルゴリズムを検討し、発電機出力の低下の傾向と一致することを確認した。定検終了後からある一定期間のスケール付着量より将来予測を行い、定検費用と比較することで定検推奨日を

提示するアルゴリズムを開発した。既設発電所の実データを利用し、将来予測を行った結果、定検推奨日は実際の定検日と3%※の誤差範囲で提示することができたため、アルゴリズムの有用性を確認できた。今後は他サイトへの適用を行い、アルゴリズムの妥当性を評価し、製品化を行う。

※3%は実際の定検日と11日の差であることを示し、365日/年のうちどれだけずれているかを割合換算した。

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

2018年7月に「第5次エネルギー基本計画」が閣議決定され、同計画において地熱発電は、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位置付けられている。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（2016年度実績 54万kW）、発電電力量113億kWh（2016年度実績 25億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 2017年度報告書（経済産業省）」によると、2017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32万kWであり、2030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、2013年度以降「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【2013 年度～2014 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【2013 年度～2017 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。【2017 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。加えて、プロジェクトの進捗状況や当該分野における技術動向、政策動向等を踏まえ、経済産業省、JOGMEC、研究開発実施者、外部有識者等と連携し、当該分野における技術開発ロードマップを策定する。

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、主なプレー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、2013年度から2021年度までの9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2015年度及び2018年度に、事後評価を2021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号イ及び第3号に基づき実施する。

6. 基本計画の改訂履歴

(1) 2013年4月1日、制定。

(2) 2015年9月15日、改定。

(3) 2017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。

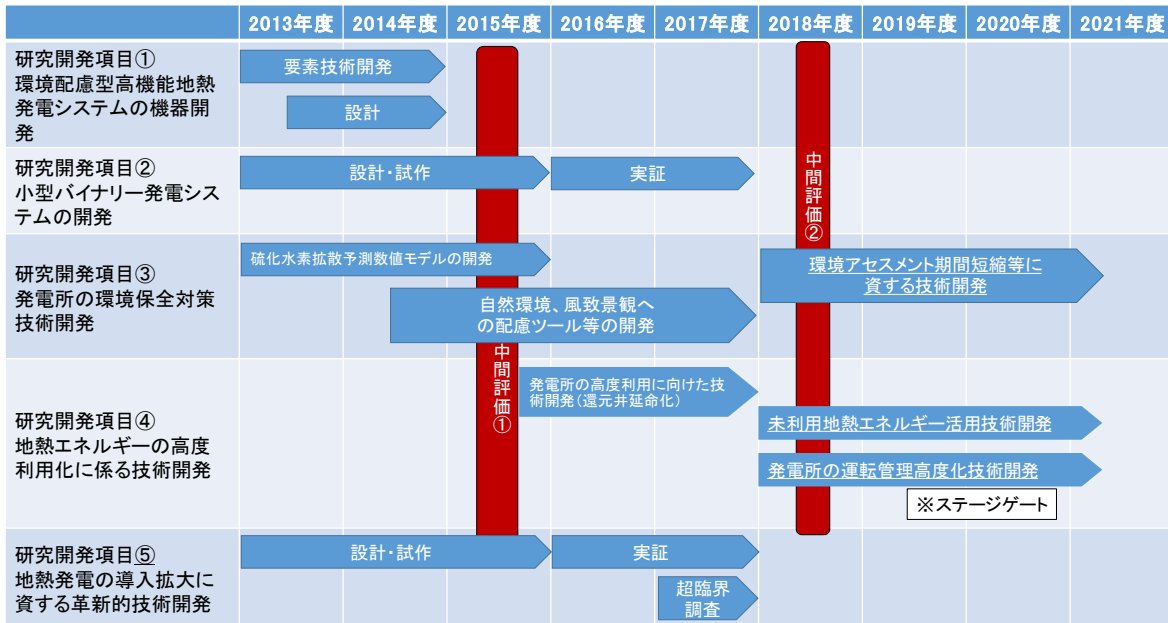
(4) 2018年2月13日、改定。研究開発の実施期間の延長及び研究開発項目の拡充等のため。

(5) 2018年4月13日、改定。PM変更のため。

(6) 2019年2月21日、改定。1. (1) ①及び②の一部内容修正、2. (2) ①にロードマップ策定を追加等のため。

(7) 2020年12月22日、改訂。研究開発期間を1年間延長のため。

(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。