

ナノテク・部材イノベーションプログラム
 環境安心イノベーションプログラム

「希少金属代替材料開発プロジェクト」

Nd-Fe-B系磁石を代替する新規永久磁石及びイットリウム系複合材料の開発
 超軽量高性能モータ等向けイットリウム系複合材料の開発 (事後評価)

(2010年3月17日～2011年5月31日)

プロジェクトの詳細説明 (公開)

(3) イットリウム系複合材料を用いた回転機要素技術開発

産業用超電導線材・機器技術研究組合
 山田穰

2011年 10月18日

1. 事業の位置づけ・必要性 (事業目的の妥当性)

公開

位置付け・必要性

永久磁石
 (PM)モータ

・RM資源難
 ・モータ=高効率化の要請
 →近年、多くの分野で需要増

Y系線材の進展
 (長さ、 I_c)
 RM削減効果大の期待
 (事前粗計算~1/10)

RM削減に対する産業用モータの重要性

消費電力の大勢を占めるモータ

全消費電力中のモータの割合
 国内電力総消費量
 99.96億kWh(2005年)の57%
 および産業部門の70%



より効率的なPMモータ
 を求める世界情勢

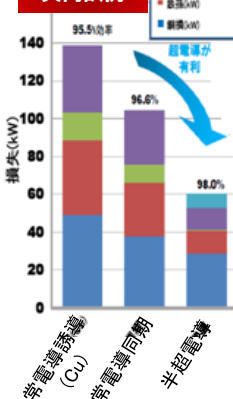
世界各国で最低エネルギー効率規制
 (MEPS)を定め法規制化

低効率 各国の効率規制(JEMA機関紙からの抜粋)

IE1	中国、ブラジル、コスタリカ、イスラエル、台湾、アメリカ(*)、カナダ、メキシコ、オーストラリア
IE2	EU(2011~2014)、中国(2011~)
IE3	アメリカ(2011~)、EU(2015~) 日本
IE4	-

高効率

各種モータ
 の効率と損失内訳例



超電導の効果: 高効率、
 コンパクト
 +RM使用量極少

導入促進

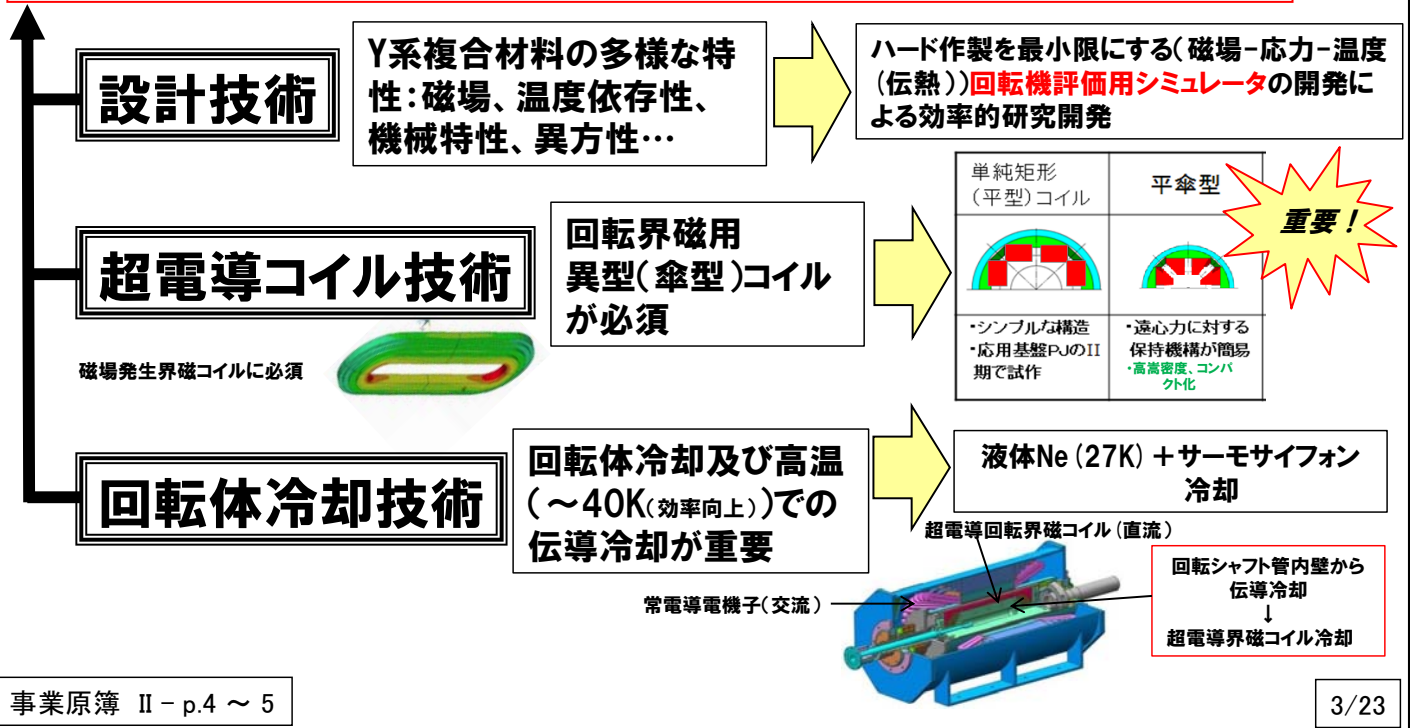
超電導による産業用モータ
 のコンパクト化



半超電導=回転界磁超電導

技術的位置付け・必要性

- ・希土類永久磁石を代替しRMの大幅な削減を可能とする技術開発
- ・超軽量かつ高効率次世代モータの実現、導入促進によるRM削減量増大



目標及びアプローチ

目標

イットリウム複合材料による500kW級-1000rpm級回転機の優位性を見通す。

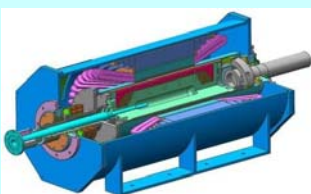
（具体的目標値）

- ・磁場-応力-温度（伝熱）を連成した**回転機評価用シミュレータ**を開発する。
- ・シミュレータを用いた総合評価により希少希土類元素使用量が**1/10**となる成立性を示す。
- ・**傘型界磁巻線**状態での特性で複合材料 ρ_c の70%以上を得ることを実証する。
- ・**Neを用いたサーモサイフォン式冷却**装置で高速回転時の回転数と冷却能力の関係を明らかにし、回転機の冷却設計を可能にする。

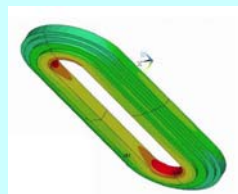
開発項目1.モータ概念設計

アプローチ

開発項目2.要素技術開発



- ・軽量、コンパクト性等の優位性を有したモータ設計
- ・RM削減率の試算
- ・モータの成立性評価 等

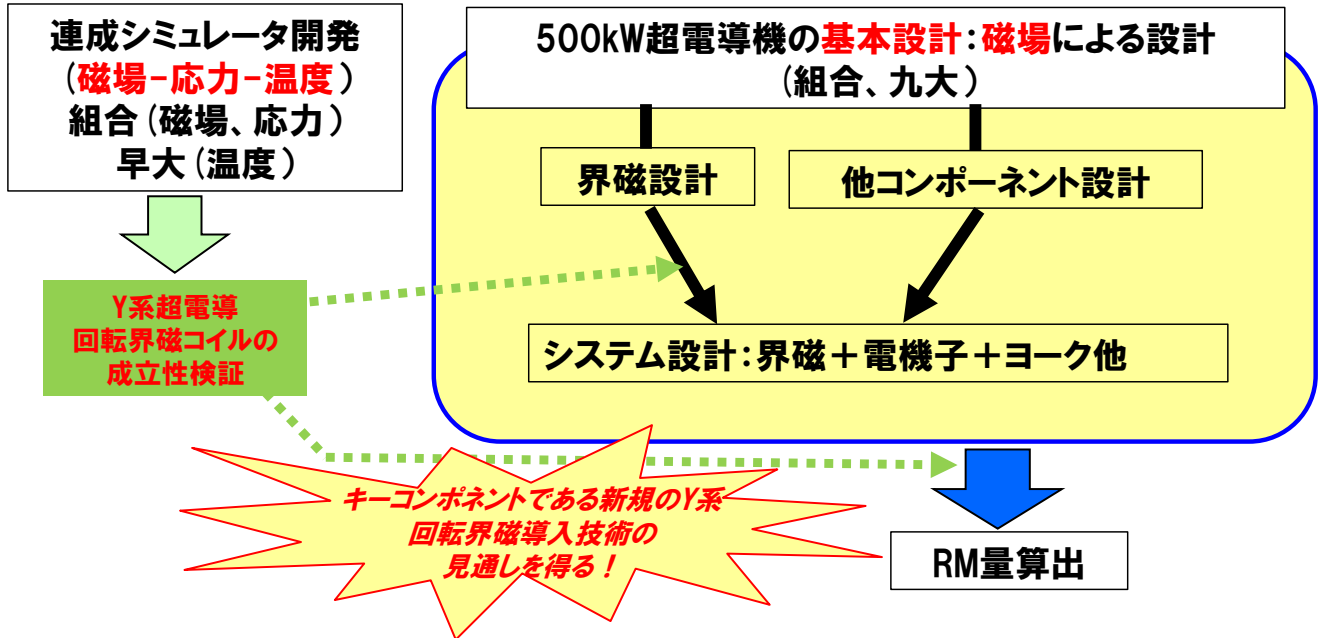


- ・異形コイル界磁巻線技術
- ・冷却技術に関する試作検討

目標、アプローチの妥当性

開発項目1.モータ概念設計

設計手順とシミュレータ



目標、アプローチの妥当性

開発項目2.要素技術開発

界磁巻線技術

回転界磁用異形(傘型)コイルが必須

界磁巻線及び冷却技術

磁場発生界磁コイルに必須



単純矩形(平型)コイル	平傘型
<ul style="list-style-type: none"> ・シンプルな構造 ・応用基盤PJのII期で試作 	<ul style="list-style-type: none"> ・遠心力に対する保持機構が簡易 ・高密度、コンパクト化

超電導→回転界磁を選定(直流使用)→傘型形状検討(高高密度)

目標基準: 傘型界磁巻線状態での特性で複合材料 I_c の70%以上

想定される劣化要因

- ・巻線層間の段差、半円形部曲げ: 曲げ歪、エッジ歪ほか
- ・電磁力、熱収縮など

機械特性(過去報告値、内部実績) フラットワイス曲げ歪特性、 ϵ_{irr} (不可逆歪、元へ戻る限界) エッジワイス対策: 従来の作製実績、予備試験から

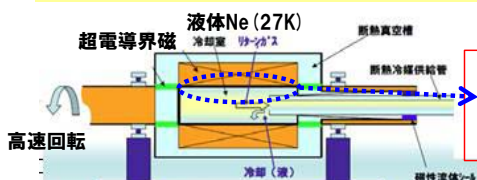
回転体冷却技術

液体Ne (27K) + サーマサイフォン冷却

界磁コイルを ~40Kに冷却

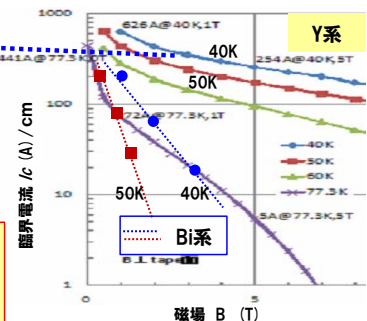
- 低温: 高 I_c
- 高温: 冷却損が小さく、高効率になる

目標基準: Neを用いたサーモサイフォン式冷却装置で高速回転数と冷却能力の関係を評価



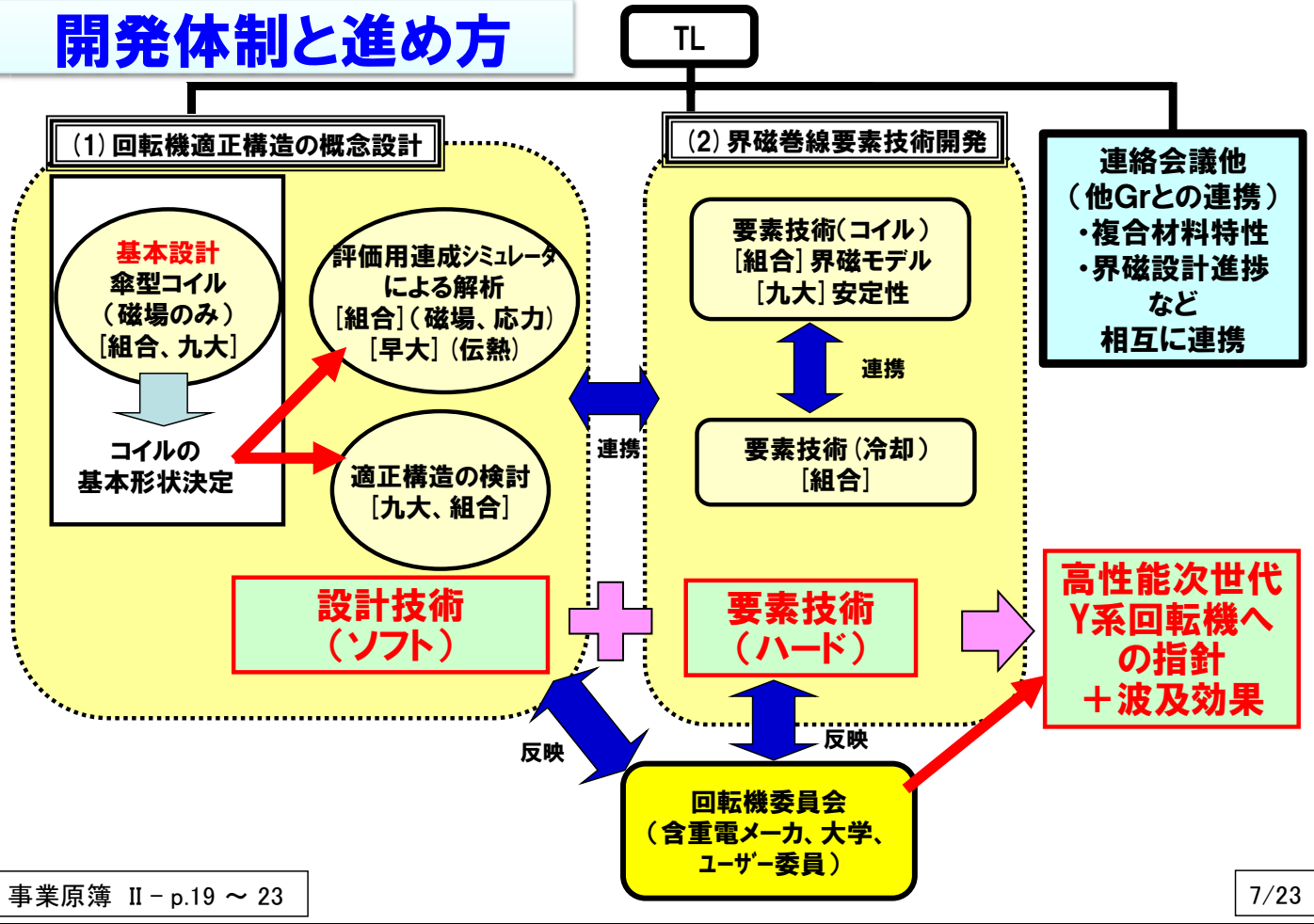
冷却液が壁面に密着→伝導により外側の界磁コイルを冷却

しかし、過去に回転界面での液体Neの熱データ(特に、熱伝達係数)無し。実機、大型機設計に必須



~40K: モータ使用磁場 (2-3T) で高い I_c が可能

開発体制と進め方



目標達成状況

③ イットリウム系複合材料を用いた回転機要素技術開発

	目標	成果	達成度
③-1 回転機適正構造の概念設計	500kW級回転機の概念設計によりイットリウム系の優位性を見通す。	<ul style="list-style-type: none"> 500 kW機設計検討で希少金属使用量が従来の1/130に低減できることを示した。 磁場、温度、応力の3要素を連成させた解析シミュレータを開発し、上記設計機を評価し成立性を確認した。 	◎
③-2 界磁巻線および冷却要素技術開発	傘型界磁巻線の試作・評価、サーモサイフォン式冷却の特性評価により、回転機の設計に資するデータを得る。	<ul style="list-style-type: none"> エッジワイズ歪、段差巻などのY系の課題を克服し、劣化なくY系傘型界磁モデルコイルの製作に成功し、回転機設計の見通しを得た。 液体Neを用い、高速回転時に30K冷却と界面の熱伝達係数hを得て、冷却設計の見通しを得た。 	◎

◎ 大幅達成、○達成、△達成見込み、×未達

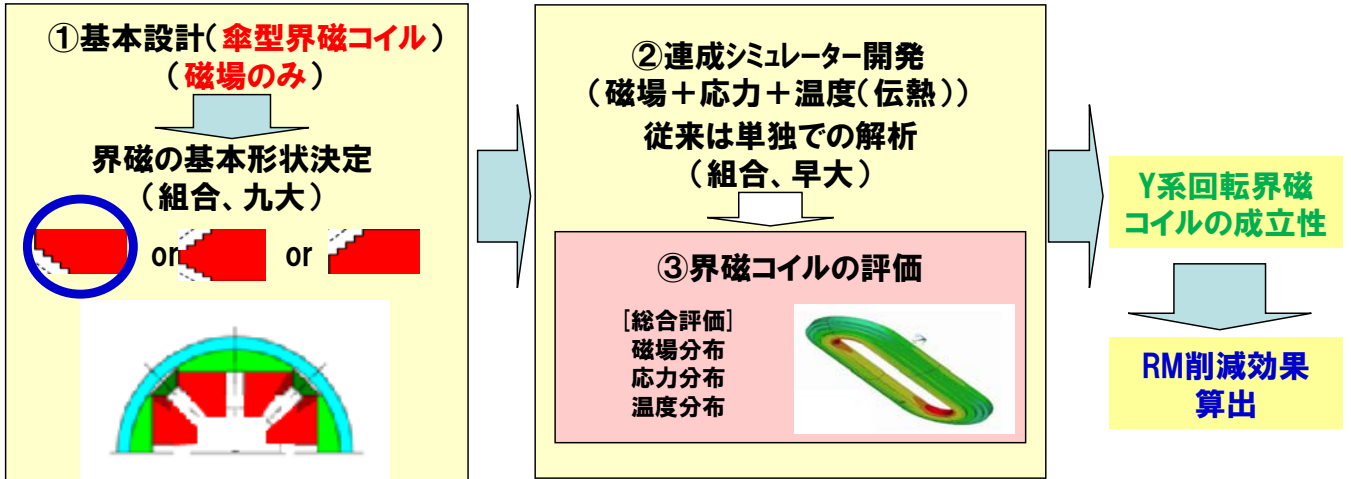
達成度の基準(具体的な目標値)

- ③-1
 - ・回転機評価用シミュレータを開発する。
 - ・概念設計により、希少希土類元素使用量が従来の1/10以下になることを示す。
- ③-2
 - ・複合材の臨界電流の70%以上の界磁巻線コイル励磁特性(励磁率70%)を得、界磁コイル設計の見通しをつける。
 - ・液体Neサーモサイフォン式冷却における高速回転時の回転数と冷却能力の関係を明らかにし、回転機の冷却設計の見通しを得る。

③-1 回転機適正構造の概念設計

課題と対策

課題	対策
Y系複合材料の 特徴を活かした回転界磁コイル構造の適正化	Y系複合材料に特有な超電導特性を評価(電磁的特性(通電 I_c など)の温度、磁界依存性ほか)
	磁場、応力及び温度(伝熱)を連成した回転機評価用シミュレータの開発、これを用いた回転機界磁コイルの評価



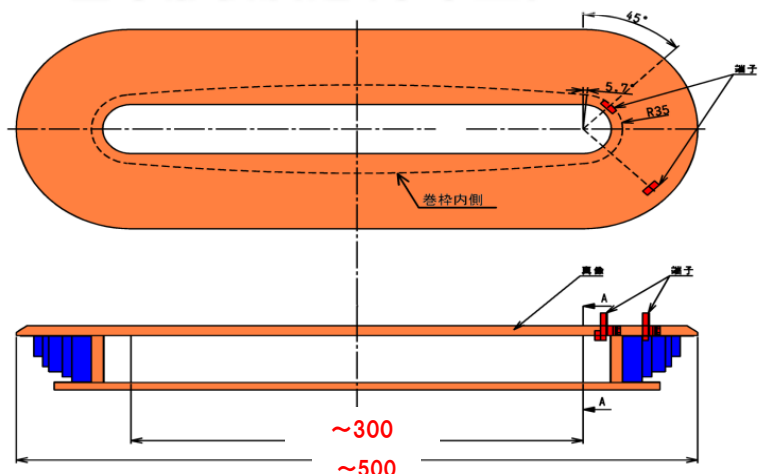
① 基本設計 傘型界磁コイル

主な仕様
 出力 500kW
 回転数 1800rpm-4極
 (産業用 1000rpm級)
 ギャップ磁束密度 ~1T
 界磁磁束密度 2-3T
40K動作



上記仕様、形状のもと具体的設計へ

基本形状決定 (平傘型)

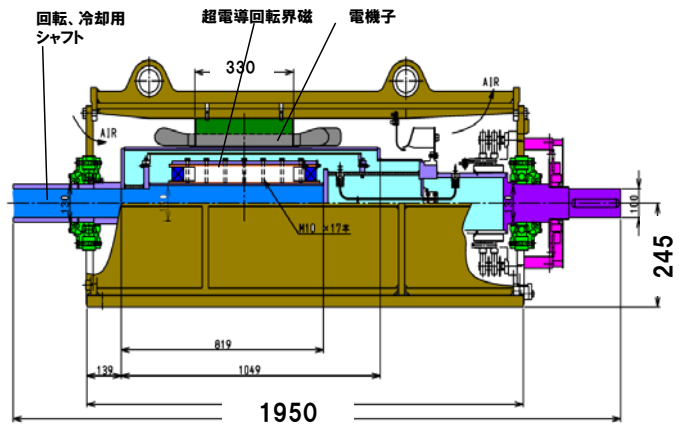


・曲げ径、各層の段差などY系の機械特性を考慮

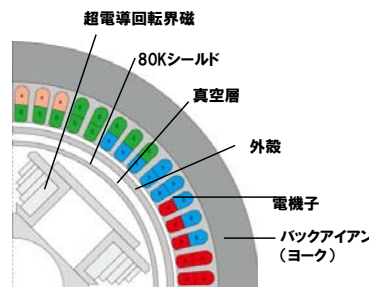
磁場+応力+温度
 評価用連成シミュレーションへ
 →Y系超電導回転界磁コイルの成立性検証

①基本設計 回転機全体

仕様	出力	500kW
	電圧	440V
	回転数	1800rpm
	極数	4
固定子	外径	490mm
	鉄心相当長	330mm
	内径	370mm
	エアギャップ	5mm
回転子 (40K)	界磁電流*	230A
	ターン数	1050
	起磁力	241.5kAT
	線材量(極)	1.2km
	界磁コイル磁束密度	3.0T
	ギャップ磁束密度	1.2T



全体断面



界磁、電機子部断面

*600A/cm幅(77K,自己磁場)線材での設計

界磁コイル→電機子、ヨークなどを含めて
モータ全体システム設計→RM削減効果等の試算

②評価用連成シミュレータの開発

Y系傘型界磁の成立性の検討

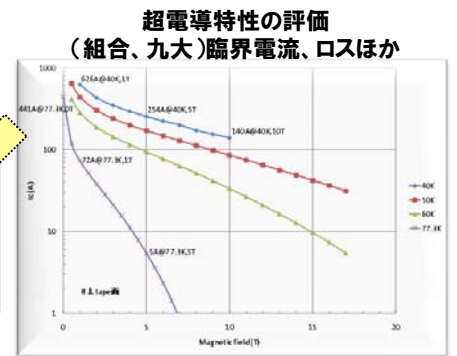
電磁場解析

超電導特性:
磁場、温度、ひずみに依存

超電導臨界電流密度 J_c 、 n 値の特性式

$$E = E_c \left(\frac{J}{J_c(B, T, \epsilon)} \right)^{\frac{1}{n(B, T, \epsilon)}}$$

J_{SC} : 超電導体内の電流
 $I-V$ 特性: 非線形



Y系複合材料の J_c-B-T 特性

熱解析

$$C \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla(\lambda \nabla T) + \dot{Q}$$

C: 熱容量
 λ : 熱伝導率
 \dot{Q} : 発熱・抜熱

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{transfer} + \dot{Q}_{Joule} + \dot{Q}_{AC}$$

$$\dot{Q}_{transfer} = h \Delta T \quad h \text{熱伝達係数} \quad \Delta T: \text{界面温度差}$$

Joule発熱
交流損失

T: 温度

u: 変位

熱ひずみ

$$\epsilon_{th} = \alpha \Delta T$$

α : 線膨張率

応力解析

$$\begin{aligned} \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + F_x &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} + F_y &= 0 \\ \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + F_z &= 0 \end{aligned}$$

応力-ひずみ関係 $\tau = D\epsilon$
T: 応力
D: 弾性係数行列
 ϵ : ひずみ

電磁力
 $F = J \times B$

遠心力
 $F = mr\omega^2$
 ω : 回転数

*形状効果 (九大)

界磁コイルの形状検討
平傘型界磁コイル

平傘型

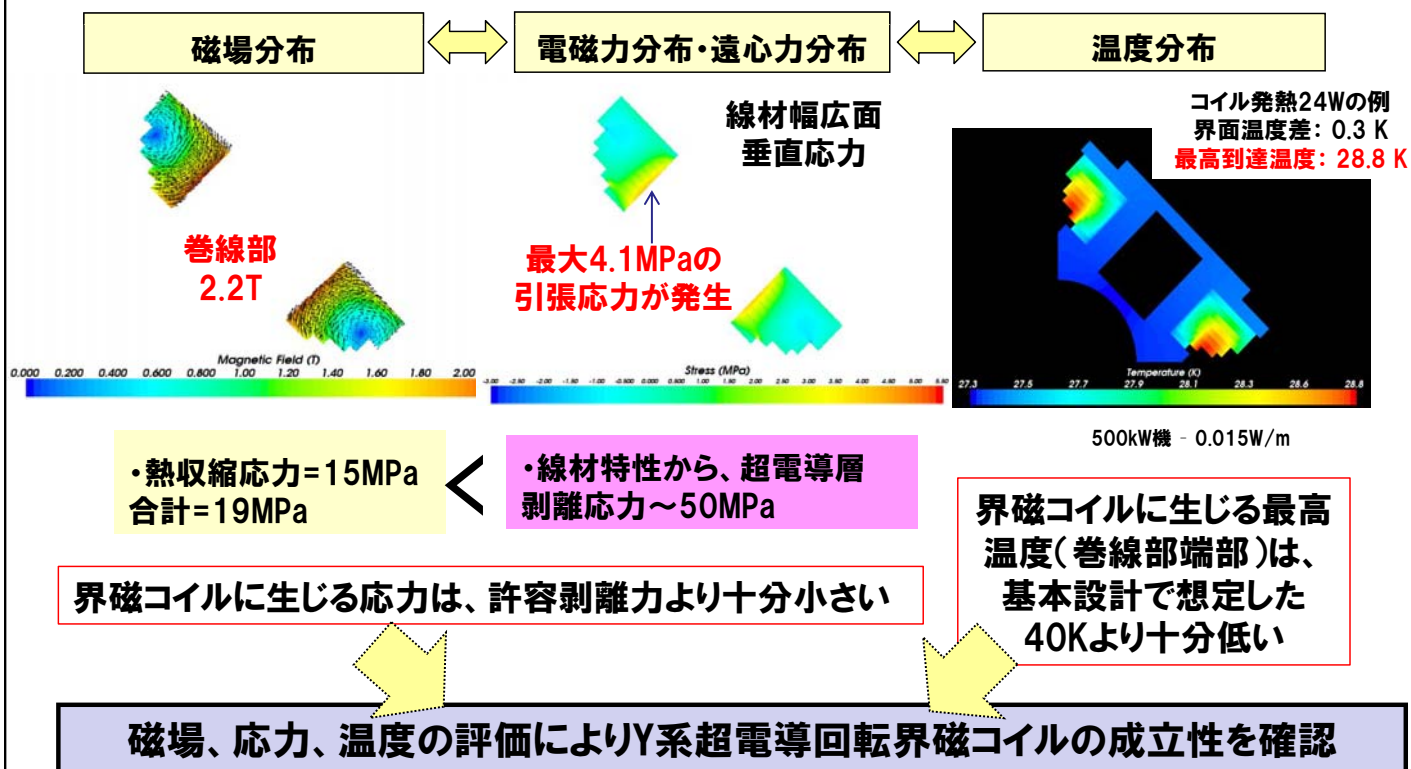


- ・遠心力に対する保持機構が簡易
- ・高傘密度、コンパクト化

液体Ne、構成材料の比熱、熱伝導率、熱伝達係数等の熱物性
*交流ロス評価(九大)

Y系複合材料,界磁コイルの構成材料の強度特性

③回転機評価用連成シミュレータによる界磁コイルの解析例



Y系500kWモータにおけるRM削減効果

- ①500kWモータ基本設計
- ②Y系界磁コイルの形状検討
- ③評価用シミュレータによるY系成立性検証→OK

目標(RM削減量 1/10以下)達成

④RM削減効果計算

RM量: 従来永久磁石機に対し 1/130

	超電導モータ	永久磁石 (PM) モータ
全体量(複合材料 (km), 永久磁石 (kg))	4.8km	50kg
希土類元素使用量 (kg)	126g	16kg

(Gd in $Gd_1Ba_2Cu_3O_{7-x}$) vs (Nd,Dy in PM)

希土類元素使用量 (Gd)
 =線材幅 (mm) x 超電導層厚さ (μm) x 比重 (g/cc)
 x Gd比 x 線材長/極 (km) x 4極 / (材料歩留り33%)
 = 5 (mm) x 1.3 (μm) x 6.3 (g/cc)
 x (157/734) x 1.2 (km/極) x 4 (極) / 0.33 = 126g

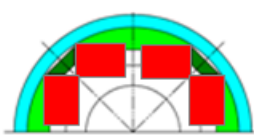

*事前検討値1/10との差
 ・今回Y系さらに特性向上
 →モータ軽量コンパクト化
 (線材量2.4kmが半減の1.2km)
 ・他方、ギャップ磁場0.5T→1.2Tへ
 ・PM同期機の磁石量増加

③-2界磁巻線および冷却要素技術開発

課題と対策

①要素技術開発 界磁コイル（組合、九大）

回転機用傘型界磁コイル形状

単純矩形 (平型)コイル	平傘型
	
・シンプルな構造 ・応用基盤PJのII期で試作	・遠心力に対する保持機構が簡易 ・高嵩密度、コンパクト化

傘型界磁コイルの課題

- ①Y系材料の実績なし
- ②巻線径、導体渡り部などでの機械的特性の影響

施策:

応力歪特性などを考慮した巻線+励磁率(コイル I_c /線材 I_c)の把握

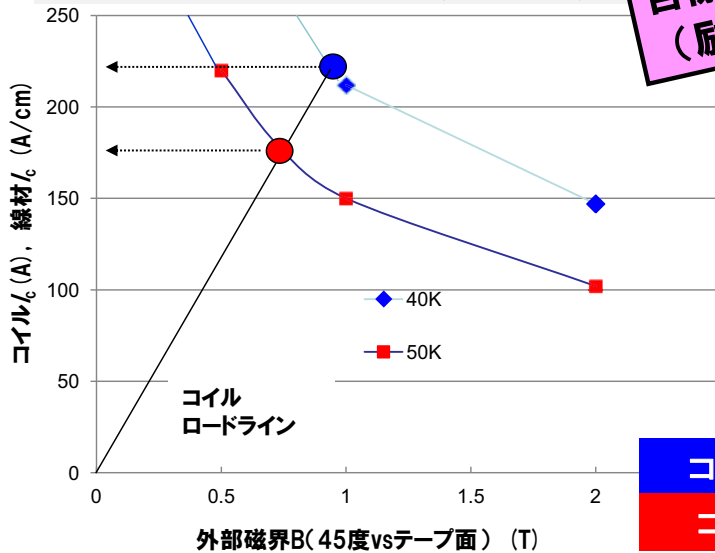
I_c -フラットワイズ曲げ歪、エッジワイズ曲げ歪特性などを事前に把握して、段差巻など巻線、製作実施

界磁巻線および冷却要素技術開発

平傘型モデルコイルの励磁試験(冷凍機冷却)

Y系傘型界磁コイル試験:
冷凍機冷却により40, 50Kで
励磁率~100% (コイル I_c /線材 I_c)

目標達成
(励磁率>70%)



平傘型

・遠心力に対する保持機構が簡易 ・高嵩密度、コンパクト化



課題: 段差巻き、エッジワイズ歪

コイル $I_c@40K >220A$

コイル $I_c@50K=180A$

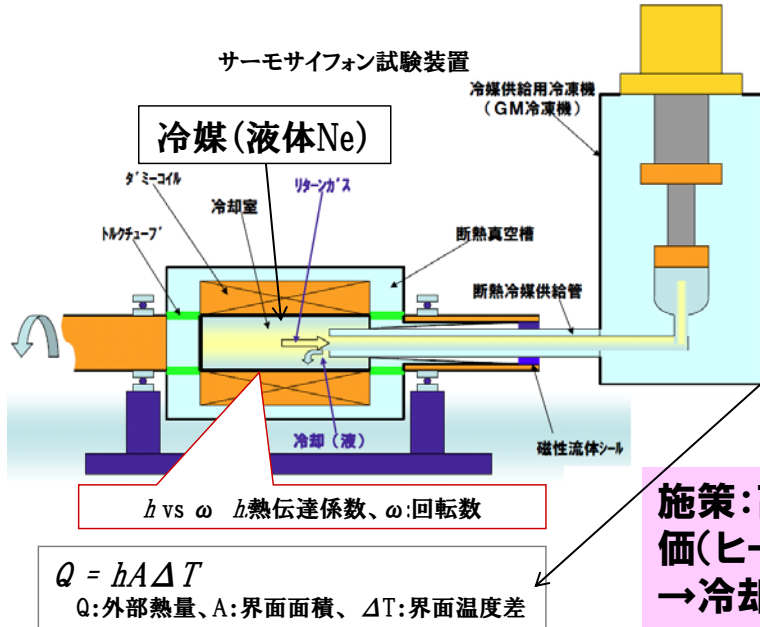
I_c 基準 1 μ v/cm

コイルロードライン: I_c が最小になる磁場印加角度で計算

③-2界磁巻線および冷却要素技術開発

課題と対策

②要素技術開発 冷却(組合)



課題

- ①温度制御性
冷媒Ne: 沸点-融点差
~2.5K (大気圧)と小さい
- ②高速回転 (1000rpm) での熱伝達係数 h などの熱設計データなし

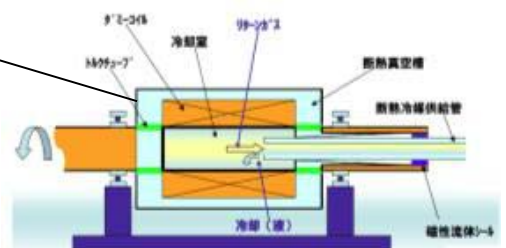
施策: 高速回転で、温度制御、熱侵入量評価(ヒータ加熱)を考慮した試験装置作製
→冷却特性、熱伝達係数 h など評価

界磁巻線および冷却要素技術開発

サーモサイフォン回転冷却試験装置の作製



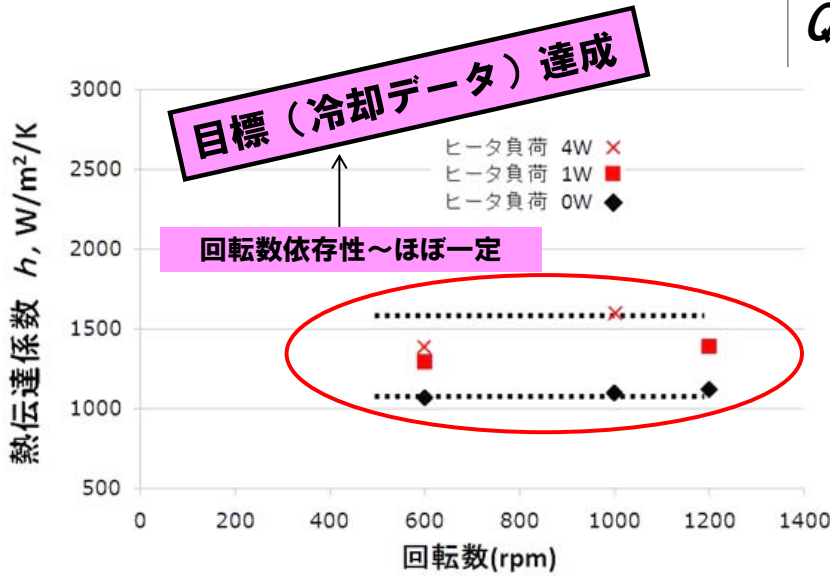
回転遠心力により冷媒(液体Ne)をシャフト壁面全体に接触させ、コイルを伝導冷却する。



液体Ne冷却 + ~1000rpmで回転

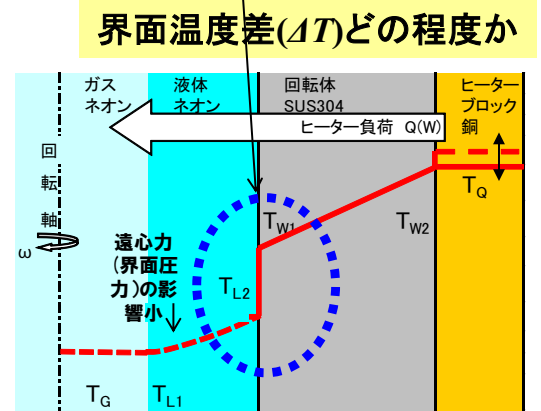
液体Ne沸点 (27K) 近傍の冷却において伝熱・温度データ取得 (次頁)

熱伝達係数 h と回転数の関係の検討



$$Q = hA\Delta T \quad (\Delta T = (T_{W1} - T_{L2}))$$

Q 外部熱量、 A 界面面積、 T 各温度



界面温度差 (ΔT) どの程度か

今回、界面温度差 $\Delta T = 0.1 - 0.3K$ 小さかった。

回転する液体Ne界面 十分な抜熱能力あり

* 大きなコイル発熱があっても界面に大きな温度差が生じることはない。SUS熱伝導率などは、従来データあり。

~1000rpmで回転する液体Ne界面での熱伝達係数 $h = 1330 \pm 260 W/m^2/K$ を初めて得ることができた。回転数依存性 = 一定 → 回転機の冷却設計が可能に

成果の意義

	成果	成果の意義
③ イットリウム系複合材料を用いた回転機要素技術開発	<ul style="list-style-type: none"> 500 kW機設計検討で希少金属使用量が従来の1/130に低減できることを示した。 磁場、温度、応力の3要素を連成させた解析シミュレータを開発し、上記設計機を評価し成立性を確認した。 エッジワイズ歪、段差巻などのY系の課題を克服し、劣化なくY系傘型界磁モデルコイルの製作に成功し、回転機設計の見通しを得た。 液体Neを用い、高速回転時に30K冷却と界面の熱伝達係数 h を得て、冷却設計の見通しを得た。 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 複合材料の異方性を考慮した設計による、Y系超電導回転機の使用希少金属量の定量的評価は世界初 ○ Y系複合材料の機械特性上の課題に対応し、高 h_c を保ちつつ、回転機用傘型コイル試作、評価は世界初

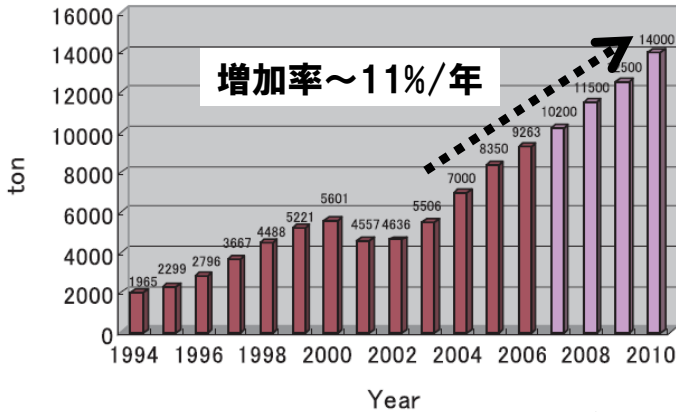
成果の意義

1. モータ概念設計

**RM使用量
1/130の効果**

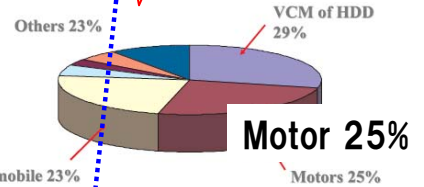


ネオジウム磁石の国内製造重量推移



2020年
40,000t/年
(予測)

投入量 (歩留65%)
61,500t/年



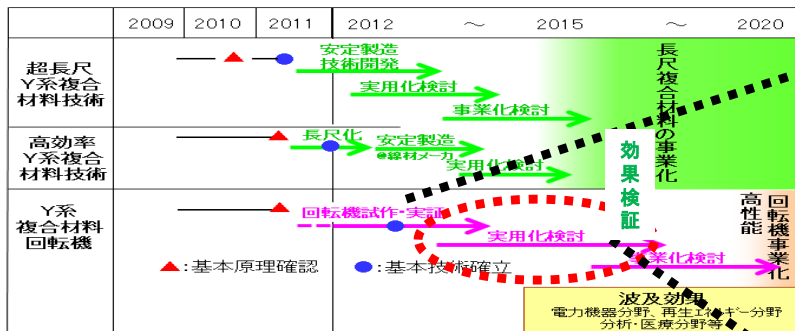
モータ用磁石重量
→ 15,400t/年

モータ向希土類重量 = 15,400t/年 x 希土類比率 (0.266) = 4,100t/年

超電導磁石置換効果 (2020年予測)
4,100 t x 導入比率 (仮定0.25) x (1-1/130) ~ 1000 t/年

出典: 2011.1 金属資源レポート p56 レアメタルシリーズ

実用化の見通し



- ・大型化実機対応技術
線材100km級の界磁コイル
大型コイル作製技術
超電導安定性試験
(クエンチ対策を含む)
- ・大型対応冷却技術
熱侵入量低減
効率向上

・有望分野の見極め
(vsコスト、利益、情勢)

・市場規模、ニーズの詳細検討
(RM, CO₂, 省エネ)

・実用化

大型実機を想定した詳細検討

- ・全体での高効率化
- ・コスト試算、検討 (線材値段含む)
- ・RM量、CO₂量 (情勢変化へ対応)

産業用500kW超電導モータによる省エネ効果試算例

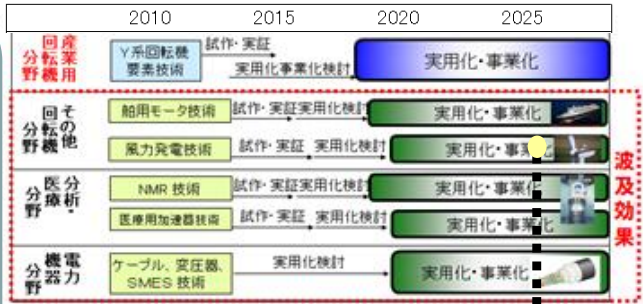
年度	2025	2030
HTS機代替率 (予測)*	2018年から3%づつ	
導入台数*	10,080	25,480
年間電力削減量 [GWh]	229	581
CO ₂ 削減量 [千ton-CO ₂]	78	198
原油換算量 [kL]	58,000	146,000

* 2010年JEMA国内生産統計から、過去の調査を基に超電導電動機の導入、代替率 (年率) を3%/年として算出

4. 実用化の見通し（波及効果）

Y系回転機の効果検討(回転機委員会)

- ・製品イメージ: 船用モータ、風力発電機
- ・市場やユーザのニーズとの合致性
RM削減、軽量コンパクト、高効率
低CO₂で顕著な効果
- ・具体的な数値上の効果
モータ、発電機: 永久磁石機に対して、
1/100程度のRM削減量
風力発電機: 大きな省エネ効果量→表



風力発電の効果試算例
(国内で5MW機導入として)

表中は、風力発電機の超電導による効率向上分(5%)
CO₂削減量 **11万トン****
原油換算 **8万kl**

5MW機では常電導風力機の導入実績無し。
超電導化で大型風力可能

年度	2025	2030
日本の風力発電導入予想 [GW]*	10	12
HTS機の導入比率(予測)	5%	30%
5MW機の導入台数	100	720
効率向上による省電力量/年 [GWh]	44.3	318.8
CO ₂ 削減量 [千ton-CO ₂] ^{***}	15.7	113.1**
原油換算量 [kL]	10,978	79,045
世界の風力発電導入予想 [GW]*	520	600

世界は50倍の規模

* World Energy Outlook 2009 (IEA) による予測 ** 2009年日本の排出量 11.5億トン
***超電導の効率向上=5%(90→95%)。5%のみを省エネ効果量として試算。また、使用したCO₂排出原単位は、360g/kWh。