■ 技術報告 ■

超電導発電機の研究開発と実証試験計画

Recent Development Progress and Verification Testing Plan of Superconducting Generators

香山博司*・柿花邦彦**
Hiroshi Kayama Kunihiko Kakihana

1. はじめに

エネルギーとしての電力は，その利便性から将来に向けて，着実な需要増大が予測されているが，供給力確保の面からは，発電所立地難による電源の大容量・遠隔化等の制約要因が顕在化しつつあり，今後長距離大容量送電が，不可避となると考えられる.

このため，電源の大容量化技術，経済的な長距離大容量送電技術等の電力システム上の課題とともに，省資源・省エネルギーなどの地球環境上の課題解決が重要であり，従来技術の限界をブレークスルーする有力な技術の一つである超電導技術を，発電機をはじめとする各種電力機器に応用する試みが，世界各国で行われている[1]．この先導的役割を果たす超電導発電機は，低リアクタンスによる電力系統安定度向上，高効率化など，現用発電機に比べ数多くのメリットを有しており，日本においても超電導発電関連機器・材料技術研究組合（Super-GM）が，通商産業省工業技術院のニューサンシャイン計画「超電導電力応用技術開発」の一環として，新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）からの研究委託を受け，20万kW級超電導発電機（パイロット機）を目指した7万kW級超電導発電機（モデル機）と，その関連機器・材料の研究開発を1988年度から11年計画で進めている.

本稿では，モデル機を中心とした研究開発，試験法および関西電力㈱大阪発電所構内に建設中の現地実証試験設備について報告する.

2. 超電導発電機の特徴

超電導発電機は，低温超電導でもその利点が十分活かされる典型的な例であり，現用機に比べ表1に示すように多くのメリットがある[2].

表1 超電導発電機の導入効果

機器性能の向上	同期リアクタンスの大幅減…	現用機の1/3～1/5
	限界送電電力の大幅増……	送電可能電力 約30%増加可能
	電圧維持能力の向上………	定格容量に等しい 無効電力供給可能
高効率化（低損失化）	発電機損失大幅減…………	6割低減可能
	発電機効率向上……………	0.5～1%向上
大容量化 小型軽量化	重量・体格の大幅減………	重量・寸法とも 約50%減
	機器製作限界の拡大………	単機最大容量 約2倍に増加可能

3. モデル機の開発状況[3),4),5)]

これまでに，構成各部の構造信頼性など，要素技術研究と部分モデルによる巻線，製造法などの検証を実施し，モデル機製作に必要な基本技術を確立した．現在，モデル機の回転子，固定子製作に注力している.

3.1 モデル機の基本設計

パイロット機の設計・製作に必要な各種要素技術を効率的に開発することを目的に界磁巻線，励磁速応性，ダンパ構造，熱収縮吸収機構など仕様の異なる3本の回転子と共用の固定子を合わせ，機械的特性等の解析を行い，表2に示す主要設計諸元を決定した[6].

3.2 超電導界磁巻線用導体

各超電導導体の諸元と特性を表3に示す[7].

(1) 低速応型A機用導体

安定化材にAlを用い，完全安定化を目指した導体

＊超電導発電関連機器・材料技術研究組合
試験センター建設所所長
＊＊　〃　システム部システム課長
〒530 大阪市北区西天満5－14－10 梅田UNビル

表2　7万kW級モデル機の主要設計諸元

		低速応型A機	低速応型B機	超速応型機
設計諸元	容量MVA	83	83	73
	電圧 kV	10	10	10
	電流 A	4,792	4,792	4,215
	Xd pu	0.35	0.35	0.45
	界磁電流(定格) A	3,000	3,000	3,200
	界磁電流(過渡) A	3,600	3,600	4,500
界磁巻線		高安定型	高電流密度型	低損失型
回転子構造	常温ダンパ	単 層	か ご 型	三 層
	熱収縮対策構造	二重軸受	フレキシブルディスク	フレキシブルサポート
固定子構造		空隙巻線／二重転位導体／水冷却方式		

表3　モデル機用導体の諸元と特性

	低速応型A機	低速応型B機	超速応型機
	高安定型	高電流密度型	低損失型
素線径 mm	0.4	1.6	0.4
導体寸法 mm	3.6×6.0	2.9×7.4	3.1×9.2
安定化材	Al	Cu	Cu
ボイド率 %	20	12	25
臨界電流 A	11,400at4T	13,770 at 5T	22,300 at 4T
	5,700at7T	7,830 at 7T	10,600 at 7T
導体抵抗(RRR) μΩ／m	6.5 at 4T,10K	174(RRR) at 0T,10K	154(RRR) at 0T,10K
交流損失 kW／m³	3.9 at 4T,5/s	18.8 at 4.6T,5T/s	8.1 at4～6T,10T/s

である．AlをCuNiで分割して高剛性とし，二重撚線構造により低損失としている．また冷却性能向上のため，導体絶縁を施していない．

(2) 低速応型B機用導体

高電流密度化と高剛性を目指した導体である．一重撚素線に，ポリイミド系導体絶縁を施し，更にプリプレグ絶縁テープを飛ばし巻きしている．

(3) 超速応型機用導体

高い界磁電流変化率での運転を可能とする為，交流損失低減を目指した導体である．細径素線を二重撚線とし，更に銅比とツイストピッチを最適化することにより，安定化と高剛性化を図かっている．また，損失低減のため，素線絶縁にホルマールを用いている．

発電機界磁巻線は，電磁力と遠心力が重畳した環境で使用される．このような複合応力下での超電導特性を検証するため，超電導複合特性試験装置を開発し，10,000回（約30年運転を模擬）の繰返し応力印加後の特性を測定し，各導体とも特性の著しい劣化は見られず，長期運転に対する信頼性に見通しを得た．

3.3 回転子

(1) 要素技術

強磁界を発生する超電導機では非磁性，高強度の構造材が求められ，種々の材料強度試験の結果，モデル機回転子構造材には表4に示す材料を選定した．また各部材間の圧着法，溶接性は小型モデル等により確認し，パイロット機に向けての材料・製作面の大型化技術を検証した．

表4　モデル機回転子の主要構造材料

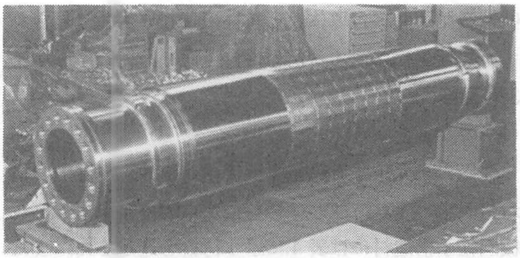
	要求事項	選定結果（材料）低速応型A機	低速応型B機	超速応型機
巻線取付軸	①機械加工性 ②溶接性 ③高電気抵抗（超速応） ④破壊靭性 ⑤繰返し疲労強度	A286	A286	改良インコネル718
トルクチューブ	①薄肉化 ②溶接性 ③高電気抵抗（超速応） ④破壊靭性 ⑤繰返し疲労強度	A286	A286	改良インコネル718
常温ダンパ ダンパサポート	①超電性 ②ダンパ，サポートの複合化 ③溶接性 ④破壊靭性 ⑤繰返し疲労強度	Ni-Cu-Al（ダンパサポート含む）	Cu(ダンパ) 18Mn-18Cr（短絡保持環） A286（サポート）	クロム銅（ダンパ） A286（サポート）
低温ダンパ又は輻射シールド	①薄肉化 ②良導電性（低温ダンパ兼用） ③溶接性 ④破壊靭性 ⑤繰返し疲労強度	SUS-Cu-SUS	A2219-T6	A286

(2) 回転子部分モデル

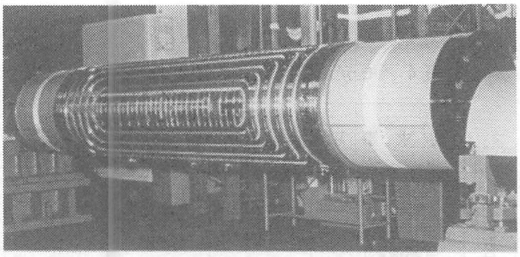
界磁巻線，構造部材特性については，回転子部分モデルにより回転場で総合検証する．低速応型機回転子部分モデルは既に回転試験を行い，液体He貯液状態での低速ターニングによるDSS運転が可能であるとの見通しを得るなど，良好な結果を得ている．一方超速応型機部分モデルは，既に巻線終了後の静止励磁試験を完了し，今後回転試験を実施する予定である．

(3) モデル機用回転子

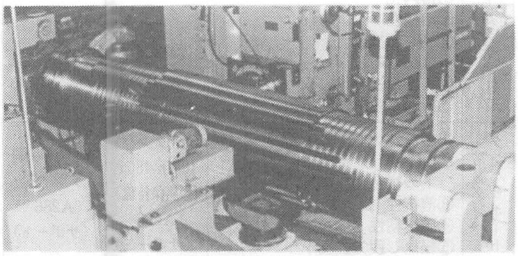
これら部分モデルでの成果を踏まえ，低速応型A機（写1），B機（写2）は，巻線完了後の静止場での超電導特性確認のため，静止励磁試験を実施した．(図-1参照)



写1　巻線終了後の低速応型A機



写2　巻線終了後の低速応型B機



写3　機械加工中の超速応型機

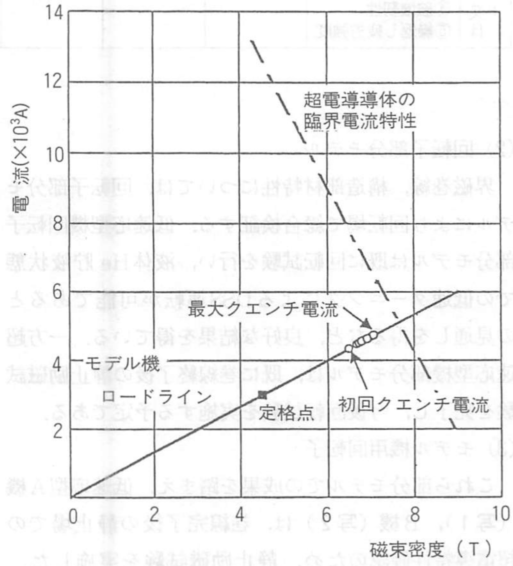


図-1　低速応型B機静止励磁試験結果

一方，超速応型機は写3に示す様に，界磁巻線取付軸の機械加工を行っている．

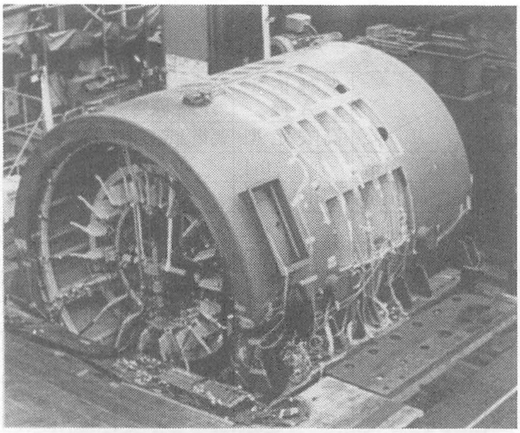
3.4 固定子

(1) 要素技術

非磁性ＦＲＰティースによるスロットレス構造となる固定子では，導体の支持・固定方法は重要課題であり，直線部，端部の導体支持構造，磁気シールドの冷却構造等の要素モデルにより，機械強度や冷却特性について総合検証を行い，良好な結果を得ている．

(2) モデル機用固定子

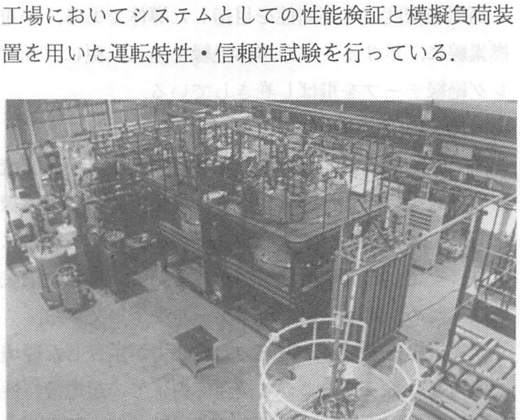
ステータ巻線モデルにより，電気的・機械的特性の総合検証を行った．現在，モデル機用固定子を製作中である．試験中のステータ巻線モデルを写4に示す．



写4　ステータ巻線モデル

3.5 冷凍システム

モデル機用冷凍システムは，回収精製系を除き，写5に示す様に，既に製作を完了している．現在，冷凍工場においてシステムとしての性能検証と模擬負荷装置を用いた運転特性・信頼性試験を行っている．



写5　冷凍システム

4．モデル機の試験法

4.1 試験の目的

工場・現地試験においては，パイロット機の基本設計の確立に向けて，下記目的を達成すべく，各試験方法について現在検討を進めている．

(1) 機器仕様，基本性能の確認および実用化のための課題解決策の実証

(2) 長期信頼性や電力系統への導入を想定したDSS等の実運用性能，および発電機のライフサイクル中に遭遇する事故等に対する耐力検証

(3) パイロット機設計・製作に向けた設計・解析手法の向上と検証，各種データの収集・蓄積

4.2 試験の分類

十分に経験とノウハウの得られている現用発電機の各種試験方法（JEC）を，超電導機に対して準用し，更に超電導機特有の固有課題については，新たに試験法を追加し，試験をその目的に応じて4種類に大別し，試験条件等について，具体的に検討を進めている．

4.2.1 一般基本試験

同期機としての機器仕様と基本性能の確認を目的として実施する試験である．JECの試験方法を準用し，定数測定など最も基本的な特性を実測するもので，無負荷飽和特性試験他15項目の試験を実施する．

4.2.2 固有基本試験

超電導機固有の機器仕様と基本性能の確認を目的として，回転子冷却・昇温特性試験他15項目の試験を実施する．超電導発電システム固有の検証項目と主要試験項目の係わりを表5に示す．

表5　超電導発電機固有の主要基本特性試験

固有項目	関連する基本特性試験	検証概要
冷却・昇温	回転子冷却・昇温試験 起動・停止試験	超電導発電システム運用のための冷却昇温特性の確認検証
冷凍機システムの能力・信頼性	液化貯液試験 連続負荷試験 起動・停止試験	通常運転状態におけるシステム設計仕様の確認検証
ダンパー機能	ダンパー試験	電磁的擾乱，熱的擾乱に対する保護機能の確認検証
クエンチ検出	クエンチ検出保護試験	クエンチ発生検出機能の確認検証
空隙電機子巻線	各種過酷試験，負荷試験	空隙電機子巻線，巻線支持構造の健全性確認検証

(1) 回転子冷却・昇温特性

工場で実施する回転子冷却・昇温試験では，図-2に示すような冷却・昇温パターンにより運転試験を行い，熱平衡に至るまでの冷媒量，到達時間，各部の温度など，回転子の冷却・昇温特性を把握する．

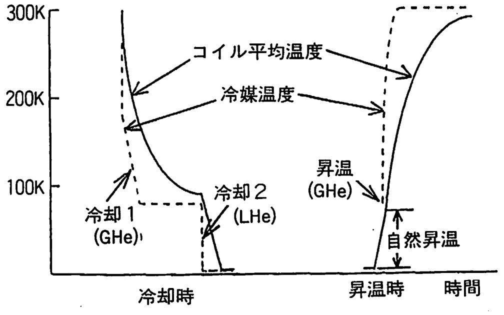


図-2　冷却・昇温パターン例

一方現地試験では，起動・停止試験を実施し，工場試験結果を踏まえ，各種冷却・昇温パターンで超電導発電システムの動作確認，冷却・昇温特性把握を行う．

(2) 冷凍システムの能力・信頼性

工場試験では，前述のように簡易模擬負荷を使用した試験を実施する．（表6参照）

表6　冷凍システムの主要工場試験項目

試験項目	概要
液化送液運転モード試験	・定格能力，最大能力の確認 ・運転制御方法の把握
液供給モード試験（デュワ単独送液）	・冷凍システム停止時の送液運転方法の把握
液供給停止モード試験	・クエンチ発生時の冷凍システムの運転方法の把握
循環精製モード試験	・回収精製系の精製能力確認

一方現地試験では，超電導発電機と組合わせ，冷凍システムの液化・貯液運転試験を起動・停止試験と合わせて実施する．本試験では，発電機への送液運転により，冷凍システムと発電機間の送液特性，部分負荷特性等について確認する．また連続負荷試験により，冷凍システム諸特性と運転信頼性を検証するとともに，各種負荷試験により，運転制御方法の確立を図る．

(3) ダンパー機能

ダンパーに加わる磁束の周波数を変化させ，系統事故時等に発生する低周波から高周波までの，電機子電流変化に対する電磁シールド特性を把握し，超電導状

態を維持できることを検証する.

(4) クエンチ検出

クエンチ検出回路により，その検出が誤りなく迅速に行なわれることを，クエンチ検出時相当の模擬電圧を印加し，保護シーケンスの動作を確認する.

(5) 空隙電機子巻線の健全性

空隙電機子巻線は，現用機では用いられておらず，技術的ノウハウや経験の蓄積も少ない.

このため，耐力確認を目的とした各種過酷試験および各種負荷試験により，空隙電機子巻線ならびに巻線支持構造の健全性を検証する.

4.2.3 負荷試験

超電導発電機が電力系統に導入された場合の各種負荷条件下での運転性能及び信頼性を検証することを目的として，下記6項目の試験を実施する.

なお，現地試験では，超電導発電機の負荷状態を得るために，図-3に示す返還負荷方式（M－G方式）を採用する[8]．本方式により，タービンや系統連系をせずに実負荷を加える事が出来る.

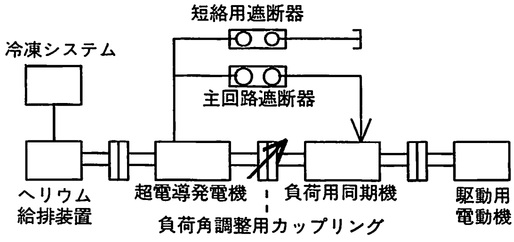


図-3 返還負荷方式（M－G方式）

(1) 励磁速応度試験

開発目標である界磁電流および界磁電流変化率（励磁速度）で励磁を行ない，所望の電圧応答性が得られることを確認する．目標励磁速度は，低速応型で0.1 pu／sec，超速応型で1.0pu／sec である.

(2) DSS対応試験

最適なDSS•WSS 運転方法確立を目的に，極低温・ターニング状態から定格運転へ，あるいは定格運転からターニング状態へと変化させて実施する.

なお実施に際しては，高速ターニングあるいは低速ターニング等，運転条件を変えて実施する.

(3) 負荷遮断試験

出力が突然遮断された場合の発電機電圧特性，電機子電流や電磁トルクの突変時に，クエンチすることなく健全であることの確認と負荷時の発電機定数の測定を行なう．一般同期機の試験法に準じ，発電機出力1／4，4／4の運転状態で，M－G装置間の主回路遮断器を開放して行なう.

(4) ヒートラン試験

発電機各部の温度上昇値，熱時定数を確認することを目的として，定格運転時に実施する.

(5) P－Q出力特性試験

可能出力運転範囲の確認と，超電導機が現用機よりも進相運転可能範囲が拡大することを検証するため，図-4に示すような目標運転点で試験実施する.

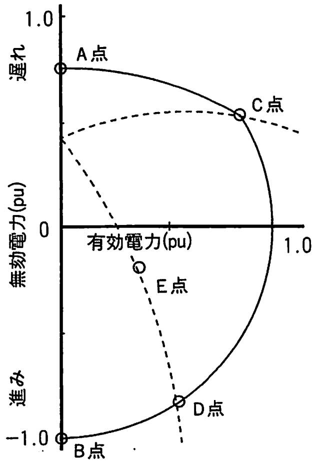


図-4 P－Q出力特性試験での目標運転点

(6) 長期信頼性試験

超電導発電システムが長期間健全に運転可能である

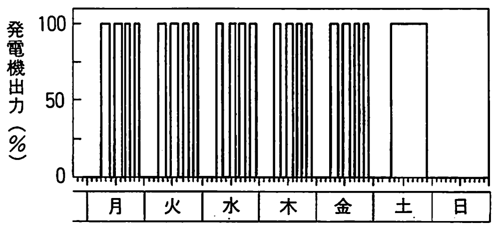


図-5 DSS・WSS運転モード

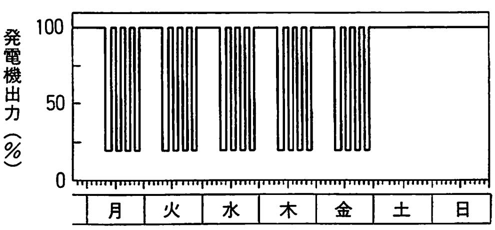


図-6 出力20〜30％運転モード

ことを検証する為，1000時間以上の運転を目標として試験実施する．定格，中間出力運転ならびに繰返し応力を付加する観点から，DSS・WSS運転の3つのモードを組合わせ，2ヶ月間実施する．（図-5，図-6参照）

4.2.4 過酷試験

前述の各種試験による運転研究の他に，パイロット機では実施困難な突発短絡試験等の過酷試験をモデル機にて実施する必要がある．

過酷試験は，発電機がそのライフサイクル中に経験すると考えられる各種事故条件下での運転性能，耐力検証を目的とし，下記の4試験に分類される．

(1) 過速度耐力試験

系統事故時の発電機回転数上昇に対する耐力を検証する．工場試験では，バランスピット内にて行うため常温，無励磁の状態で，過速度115%，2分間の条件で遠心力に対する強度確認，及びバランスチェックを主眼に試験を実施する．また，系統事故による発電機解列時の速度上昇が，106%～108%程度であり，かつ非常用ガバナが111%で動作することを考慮し，現地試験においては，極低温，有励磁の状態で，過速度111%，2分間の条件で試験を実施する．

(2) クエンチ試験

超電導システムの信頼性，安全性等の検証と，最大励磁電流・励磁速度の把握，および技術基準等で定める圧力容器の耐圧試験として実施する．

工場試験では，無負荷運転状態で，ヒータ過熱あるいは励磁パルスの増加等により試験を実施する．

現地試験では，有負荷運転状態で，界磁電流変化等により試験を実施する．

(3) 過大逆相試験

多相再閉路運用時に超電導発電機が運転可能であることの確認と，逆相電流に対するダンパー効果を検証する．なお，超電導発電機の不平衡負荷耐力が，現用機よりも向上することを検証するため，連続逆相耐量，短時間逆相耐量とも，現用機の規定値よりも高い値をクリアーすべく，目標値を設定し試験を実施する．

(4) 突発短絡試験

発電機の主変圧器高圧側至近端での三相短絡事故時に，クエンチなどの異常のないことを検証する．

試験実施に当っては，現地試験設備上の制約等から，等価な条件が得られる試験方法により試験実施する．

具体的には後述するが，発電機の総合的耐力検証，特にステータの耐力検証としては，無負荷低減電圧法を用い，界磁巻線の健全性検証としては，180度異位相投入法を用い試験を実施する．

4.2.5 等価試験

実際の電力系統では，発電機から相分離母線・変圧器等の設備を通して送電している．

主変圧器高圧側至近端の送電線への雷撃等，電力系統で遭遇する最も過酷な三相短絡事故時にも，発電機に損傷がなく，事故除去後，運転継続できることを検証する必要がある．（図-7）

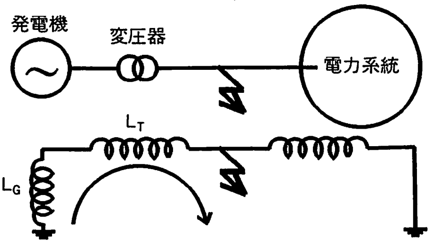


図-7 変圧器高圧側三相短絡事故（実系統）

このため，主変圧器を省略した試験設備のもとで，系統事故時と等価な外乱を，超電導発電機に与えるための等価試験方法を検討した．機械的，熱的，電磁的等価性を満足させるため，電機子電流，初期界磁電流，界磁電流最大変化率，及び電磁トルクの大きさを等価性指標とした．新に開発したM－G動特性解析プログラムを用いて解析した結果，無負荷低減電圧法（図-8）

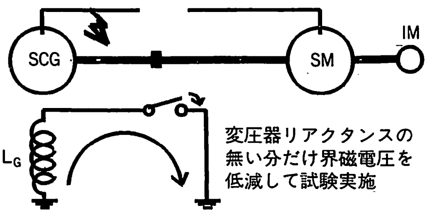


図-8 無負荷低減電圧法

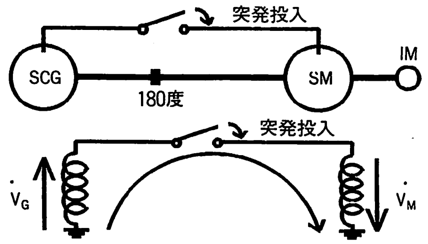


図-9 180度異位相投入法

と 180度異位相投入法（図-9）を，相互補完的に実施することにより，図-10 に示すように系統事故時とほぼ等価な外乱を発電機に加えることができる.

5．現地実証試験設備の概要

5.1 現地実証試験設備の基本設計の考え方

大規模な試験設備が必要であり，かつ試験期間も長期にわたるため，試験設備の適正化，効率化を最重点に考え，次のような考えで設備構成及び仕様を検討し，図-11 に示すような設備とした.

(1) 現地試験の効率的な実施

①設備構成は，低速応・超速応励磁，DSS，負荷追従試験の実施が可能なこと等，発電機として必要最低限のシステム構成とする.

②P－Q可能出力曲線全領域で負荷運転可能となるよう，負荷角調整用カップリングを設置する.

③クエンチあるいは，過酷試験時の機器耐力を有する設備とする.

④応力解析，電磁力解析等の各種解析データと採取データの対比可能なデータ処理装置を設置する.

(2) コストの低減

①原則として，各研究開発機に共用可能な試験設備とし，また負荷用同期機および受電用トランスなどに，既存の設備を流用した.

②研究用設備であることから，冗長系の削減あるいは一部装置・機器については，一般工業向け仕様を採用した.

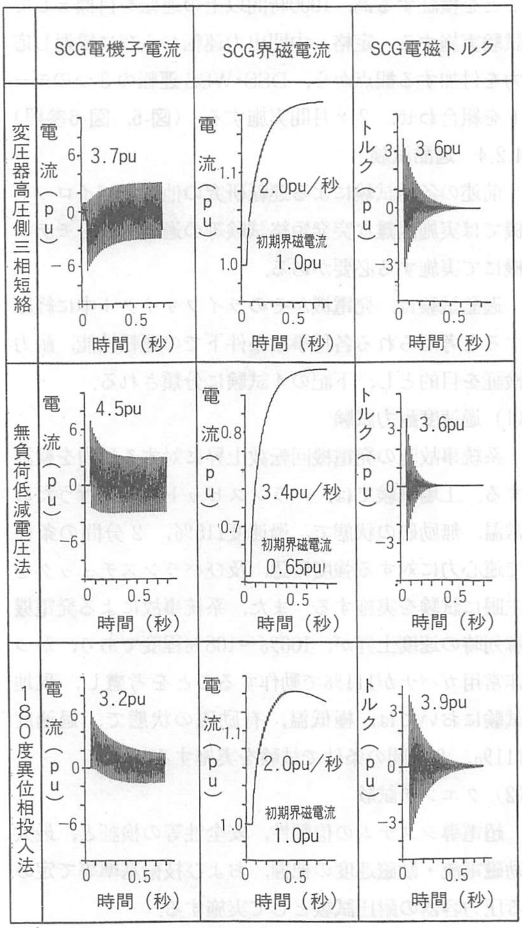


図-10　等価試験方法の解析結果

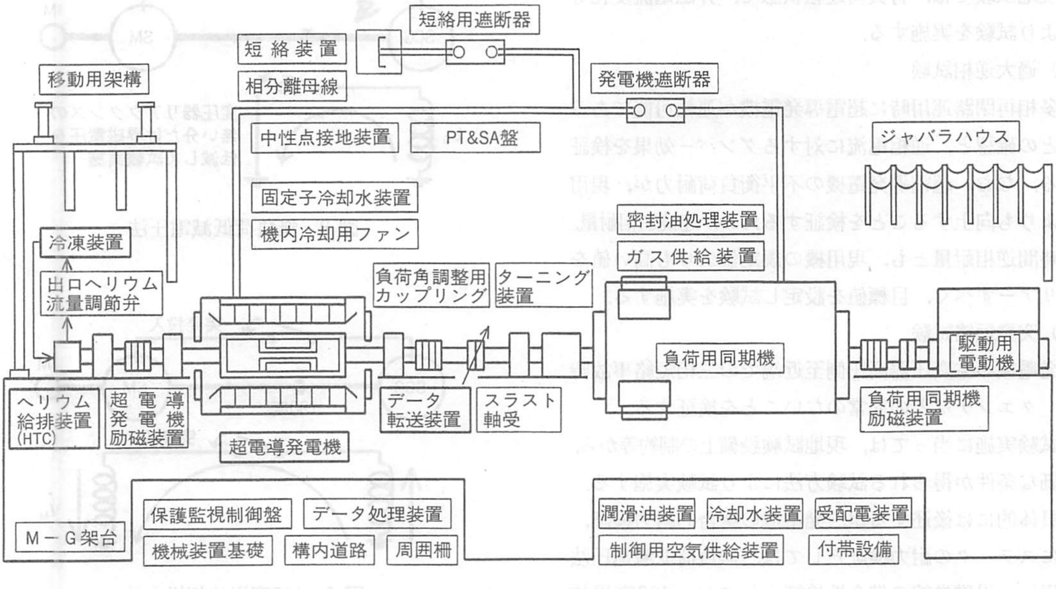


図-11　現地実証試験設備の概要

③天井クレーンの代わりに，移動用架構と油圧ジャッキシステムを採用した重量物据付方法を考案した.
④建物建設範囲低減のため，主要機器は屋外仕様とし，雨天時の機器分解点検用として，ジャバラハウスを採用した.

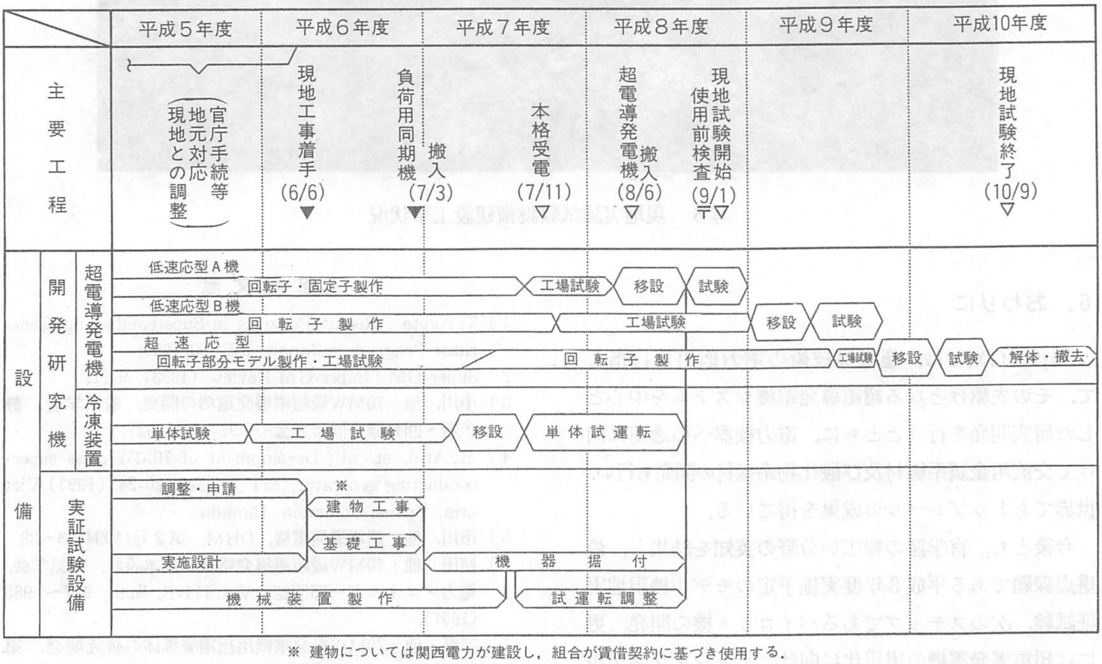
(3) 適用法規，技術基準等の遵守

超電導発電機設備については，冷凍装置を含めて，「発電所」として，電気事業法による一元管理とすることになり，「自家用電気工作物設置工事計画認可申請」を行ない，電気事業法に基づく認可を受けた．冷凍装置については，申請の添付資料の一つとして，高圧ガス取締法に準じた「冷凍装置に関する説明書」を作成し，この装置の高圧ガス取締法から見た保安上の適合状況等を，検査等の専門機関に審査依頼した.

5.2　現地実証試験設備の建設

試験設備の設計，製作および建設は，表7に示すスケジュールにより，研究開発機の開発状況と整合性を図り，関西電力㈱大阪発電所構内にて計画的に進めている．なお，試験設備の完成予想図を図-12に，現在の建設状況を写6に示す.

表7　現地実証試験に向けてのスケジュール



※ 建物については関西電力が建設し，組合が賃借契約に基づき使用する.

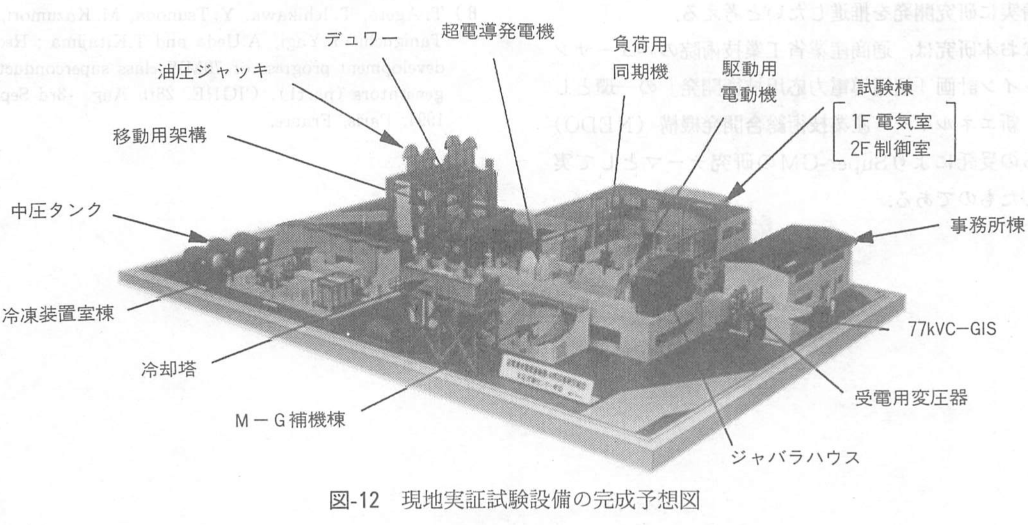


図-12　現地実証試験設備の完成予想図

写6　現地実証試験設備建設工事状況

6．おわりに

Super-GMでは，超電導技術の電力応用を目指して，その先駆けとなる超電導発電機システムを中心とした研究開発を行うとともに，電力機器への適用に向けて交流用金属系線材及び酸化物系線材の開発も行い，世界でもトップレベルの成果を得ている．

今後とも，官学産の幅広い分野の英知を結集し，最重点課題である平成8年度実施予定のモデル機現地実証試験，次のステップであるパイロット機の開発，更には超電導発電機の実用化に向け，チャレンジングかつ着実に研究開発を推進したいと考える．

なお本研究は，通商産業省工業技術院のニューサンシャイン計画「超電導電力応用技術開発」の一環として，新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）からの受託によりSuper-GMの研究テーマとして実施したものである．

参考文献

1）T. Ageta ; Recent Progress in Superconducting Generator Program in Japan, ISS '90, 1990.
2）Super-GM ; Super-GM Review (1993), 9-11.
3）小川，他；70MW級超電導発電機の開発，電気学会，静止器・回転機合同研究会SA-92-75 (1992).
4）K. Arai, et, al ; Development of 70MW class superconducting generator, MT-13, Sept,20-24 (1993),Victoria, British Columbia, Canada.
5）市川，他；超電導発電機，OHM，第2号(1994)33～38
6）植田，他；70MW級超電導発電機の基本設計，電気学会，電力・エネルギー部門誌 Vol. 111-B, №9，977～985 (1991).
7）宇野，他；70MW級発電機用超電導導体の研究開発，第52回低温工学・超電導学会D1-11
8）T. Ageta, T. Ichikawa, Y. Tsunoda, M. Kazumori, H. Taniguchi, Y.Yagi, A.Ueda and T.Kitajima ; Recent development progress of 70MW class superconducting generators (part1), CIGRE, 28th Aug. -3rd Sept., 1994, Paris, France.