

50MVA級超電導同期発電機の開発

Development of 50 MVA Superconducting Generator

超電導同期発電機は、次世代の大容量タービン発電機として期待されているが、低温多重円筒回転子や空隙電機子巻線が用いられるなど、在来機とかなり異なる構造上の特徴がある。

日立製作所は、超電導発電機の性能把握と実用化基礎技術の確立を目的として、50MVA級機を製作した。試験の結果、予冷運転は約40時間で順調に終了し、超電導回転子は3,000rpmで安定に回転し、定常及び過渡電気特性が把握できた。この成果を次のステップとして、予想される500MVA級実用機の開発に反映させていく考えである。

植田清隆*	Kiyotaka Ueda
牧 直樹**	Naoki Maki
高橋典義**	Noriyoshi Takahashi
尾形久直***	Hisanao Ogata
実松俊弘****	Toshihiro Sanematsu

1 緒 言

現在、火力発電及び原子力発電に使用されるタービン発電機の回転子は、水素ガスあるいは水により冷却されているが、液体ヘリウムで冷却される超電導界磁巻線を用いると大幅な重量低減、効率向上及び電力系統安定度向上が期待できる。この超電導界磁巻線をもつ同期発電機(以下、超電導発電機と略称する。)には、低温多重円筒回転子や空隙電機子巻線が採用されるなど、在来機とかなり異なる構造上の特徴がある。そこで、超電導発電機の諸特性を把握するために、数～数十メガボルトアンペア試作機の開発が世界各国で進められてきた^{1)~3)}。電力中央研究所と日立製作所は協力して50MVA級試作機の開発を進めており、既に50MVA超電導回転子を製作し、これと小形固定子とを組み合わせて発電試験に成功した⁴⁾。

本報では50MVA級超電導発電機の概要と特徴、回転子と固定子の試験結果、及び今後の開発課題と展望について述べる。

2 超電導発電機の特徴と開発概況

2.1 構造上の特徴と機能

図1に50MVA超電導発電機の概略構造を示す。回転子は主に高磁界を発生させる超電導界磁巻線、それを支持するトルクチューブ、回転子にヘリウムを供給、排出する給排部、電機子反作用交流磁束から超電導界磁巻線を電磁的に遮へいするダンパシールド、及び輻射シールドから構成される。超電導界磁巻線部への熱侵入防止の点から、トルクチューブ、輻

射シールド及びダンパシールドは円筒構造とし、各円筒体間を真空に維持して断熱する。他方、固定子は主に界磁の高磁束密度を許容する空隙電機子巻線、及び外部磁気シールドとなる固定子鉄心から構成される。更に、超電導界磁巻線を冷却するためのヘリウム液化装置、及び励磁するための直流電源が発電機外部に設置される。

2.2 世界の超電導発電機開発状況

図2に各国の超電導発電機開発状況を示す。

アメリカは最も積極的に開発を進めており、WH(ウエスチングハウス)社の5MVA機とGE(ゼネラルエレクトリック)社の20MVA機の開発に引き続き、WH社がEPRIの資金援助の下に300MVA機を開発中である。

ソビエトは1.5MVA、20MVA機を開発した後、現在300MWプロトタイプ機を製作中と言われている。

西ヨーロッパでは、大容量機を対象として実物大コンポーネントの開発を進めてきたが、フランスは250MW機ロータモデル試験を完了し、西ドイツは400MVAプロトタイプ機を開発中である。

我が国では30MVA機と50MVA機が製作されており、1983年に各種性能試験が行なわれている。

以上述べたように、世界各国とも次世代の大容量発電機は超電導発電機になるとの認識に立って、数～数十メガボルトアンペア試作機の開発が進められてきた。今後は、数百メガ

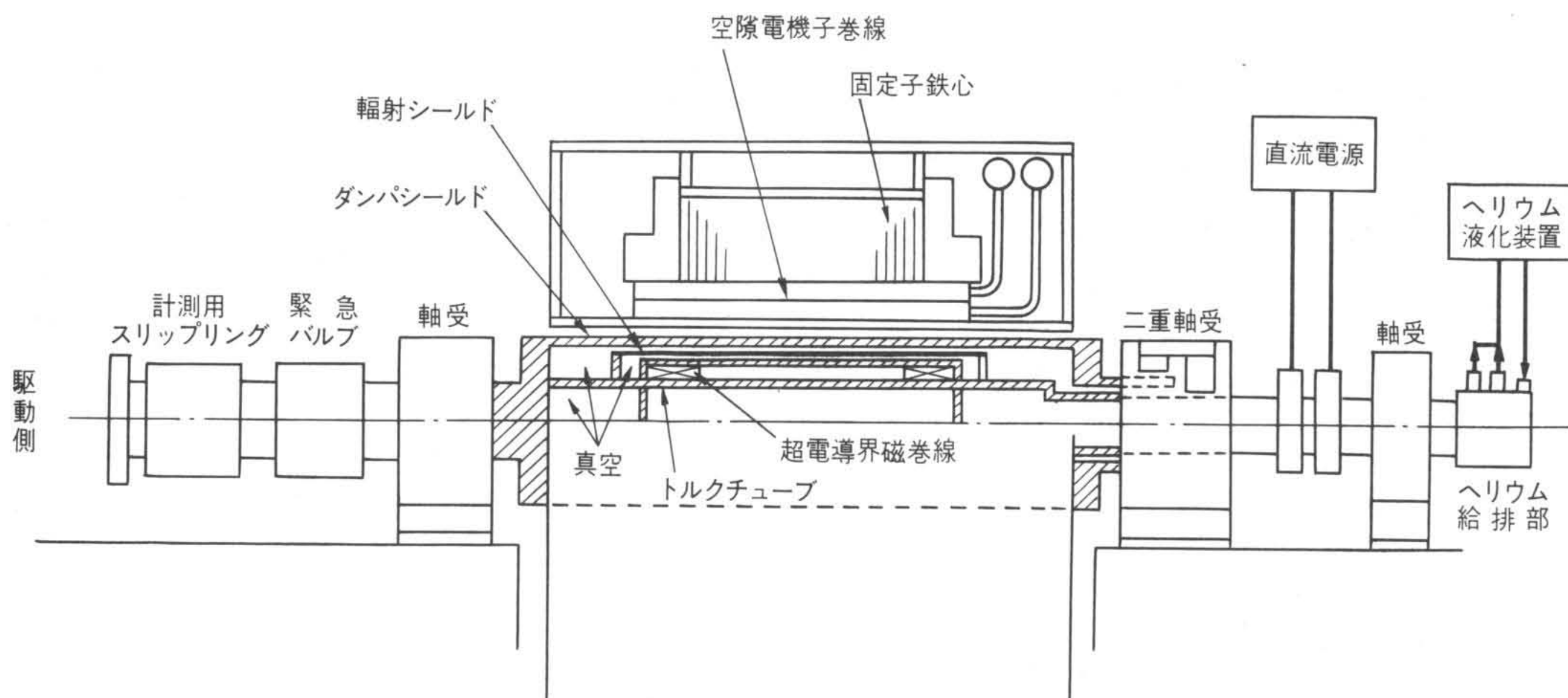


図1 50MVA超電導発電機の概略構造 回転子の外径0.6m、固定子の外径2.8m、軸受スパン3.9mの体格であり、定格電圧16kVと定格電流1.8kAの仕様をもつ。

* 財団法人電力中央研究所システム部 ** 日立製作所日立研究所 *** 日立製作所機械研究所 **** 日立製作所日立工場

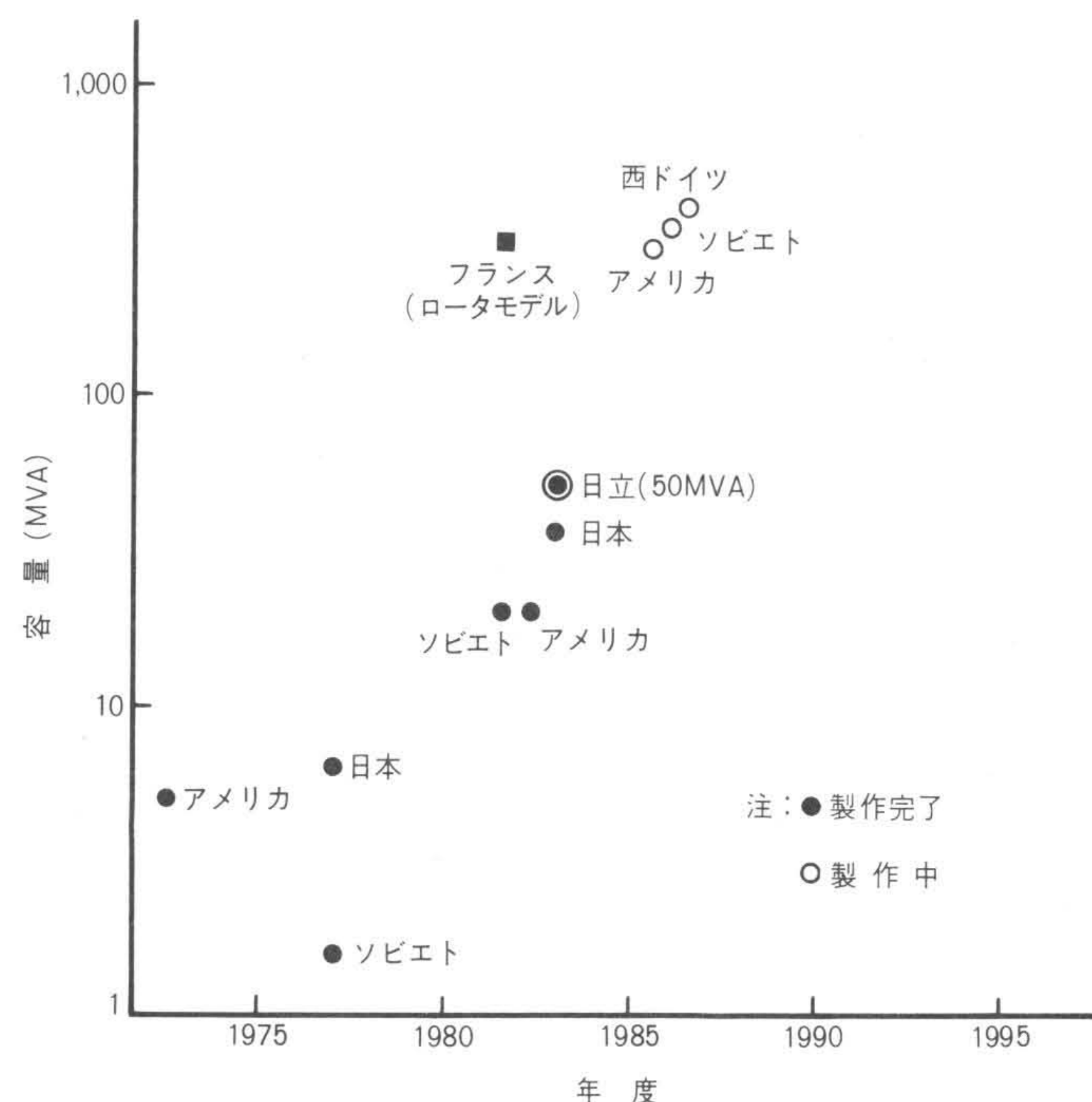


図2 超電導発電機の開発状況 現在、我が国では30MVA機、50MVA機の開発が進められており、アメリカ、ソビエト、西ドイツでは300～400MVA実用機の開発が鋭意進められている。

ボルトアンペアのプロトタイプ機の開発が中心になると思われる。

3 50MVA機の概要

図3に50MVA機回転子の据付け状況を、表1及び次節に50MVA機コンポーネントの特徴を示す。

3.1 超電導界磁巻線

超電導界磁巻線の線材としては、界磁の最大磁束密度が5～6Tになること、及び巻線作業の容易さを考慮して、合金系線材のNbTiZr多心線を使用した。次に、超電導体が機械的動きで生ずる摩擦熱によってクエンチするのを防止するため、エポキシ樹脂含浸のくらは形集中巻超電導界磁巻線とした。この界磁巻線は、図4に示すようにトルクチューブに設けられたくらは形スロット内に挿入した後、外表面から非磁性鋼バイ

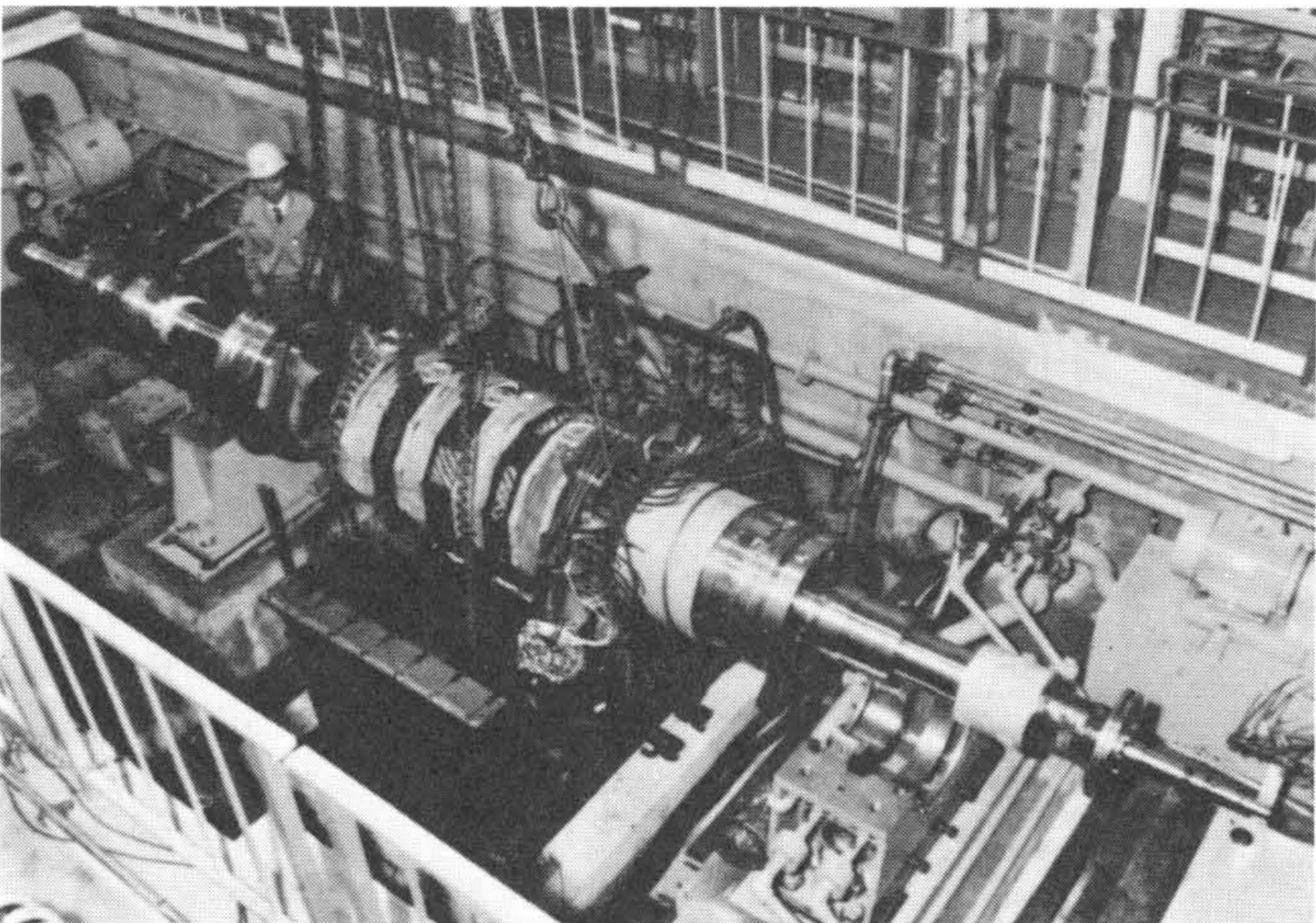


図3 50MVA機回転子の据付け状況 回転子はピット内につり込まれた後、左側配置の可変速誘導機によって駆動され、右端に取り付けられたヘリウム給排部と集電部を通して、ヘリウム供給及び界磁励磁が行なわれる。

表1 50MVA機コンポーネントの特徴 ヘリウム自然対流冷却のくらは形集中巻界磁巻線、水冷ヘリカル空隙電機子巻線、銅合金とステンレス鋼の複合二重ダンパ及び二重軸受支持が主な特徴である。

超電導界磁巻線	多重円筒回転子
導体：NbTiZr多心線、銅比4.5 巻線：エポキシ樹脂含浸くらは形集中巻 支持：スペーサと非磁性鋼バインド 冷却：ヘリウムの浸せき自然対流冷却	構成：三重円筒(二重ダンパ) 材料：ステンレス鋼(SUS)、ダンパは(銅合金+SUS) 熱収縮対策：一端に二重軸受
空隙電機子巻線	ヘリウム冷却システム
導体：1mm径素線の二重転位 巻線：ヘリカル巻(180°スキュー) 支持：内周角形鉄心にキー固定 冷却：ステンレスパイプの間接水冷	冷却：Self Pumping作用によるヘリウム循環の直接冷却 液化機：クロード式、100l/h システム：デュウ使用の閉ループ

ンド線で強く固定した。トルクチューブと界磁巻線内周間には、短ざく状絶縁スペーサを多数取り付け、液体ヘリウムの流路形成と界磁巻線の対地絶縁を構成した。超電導界磁巻線の冷却には、トルクチューブ極低温部両端からの侵入熱による熱サイフォン作用を利用した。すなわち、トルクチューブ極低温中央部と端部に設けた複数個の孔を通して、内部の液体ヘリウムが自然対流循環して、超電導界磁巻線を冷却する方式を採用し、十分な冷却効果をもつことを確認した。

3.2 多重円筒回転子

トルクチューブには、極低温で機械強度とじん性の高いステンレス鍛造鋼を採用した。トルクチューブ中央部は静止時の常温(300K)から運転時の極低温(4.2K)へと温度変化するのに対して、トルクチューブと同心状に結合されるダンパシールドは常温で使用される。したがって、この両者をそのまま結合したのでは大きい熱収縮応力が発生するので、この対策として、先の図1に示すように反駆動側でトルクチューブとダンパシールドを別々に支持する二重軸受を用いた。

ダンパシールドは、過渡時の回転子動揺に対する電磁ダンパ作用と、電機子反作用高調波磁束の電磁シールド作用をもつので、低電気抵抗と高機械強度が得られるように、銅合金の内側を高強度非磁性鋼で補強した2層構造を採用した。

輻射シールドは、ダンパシールド(300K)から超電導界磁巻

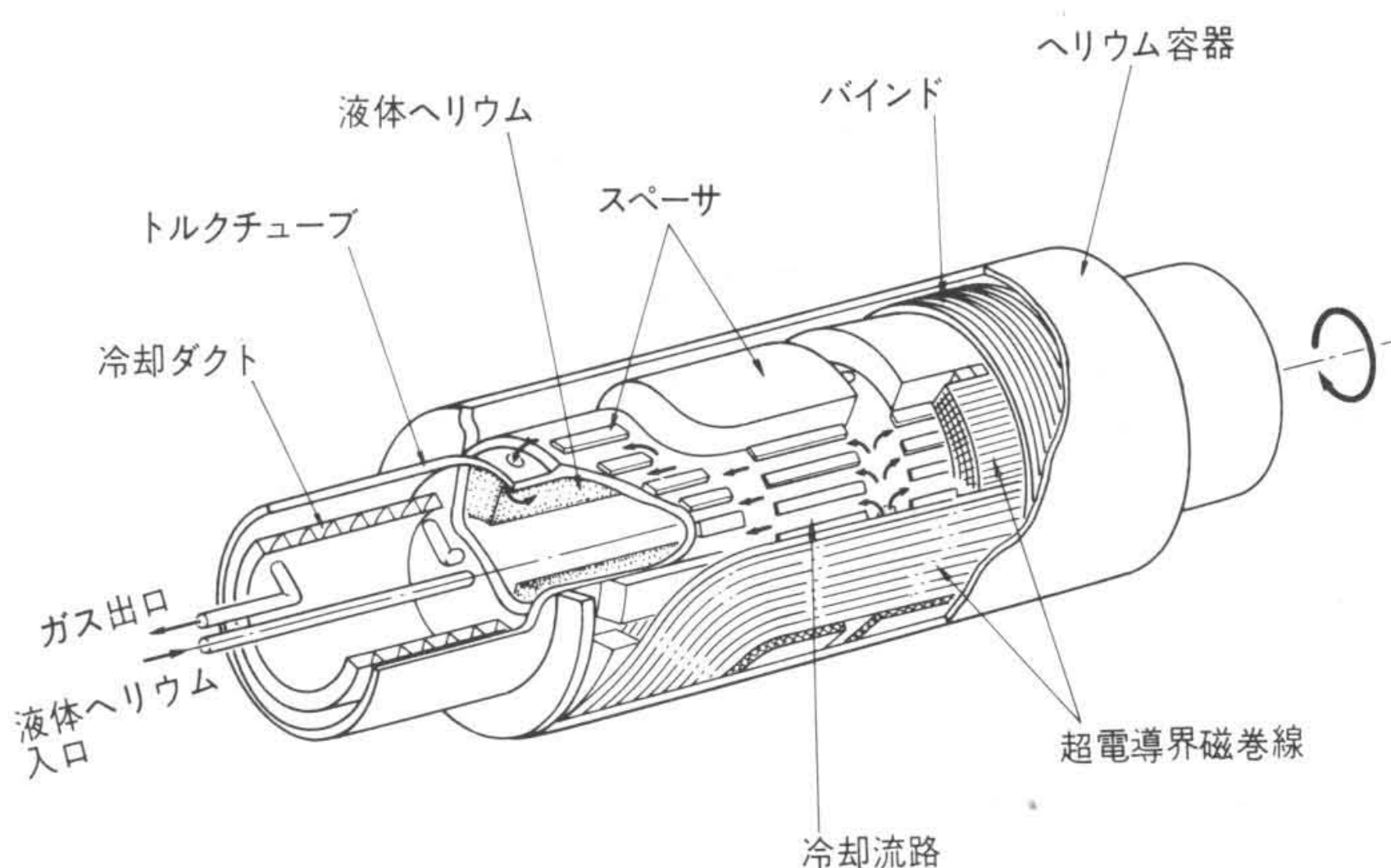


図4 超電導回転子の内部構造 主極スペーサの周囲にくらは形超電導界磁巻線が取り付けられ、外表面からバインド線で固定される。軸心部から供給された液体ヘリウムがトルクチューブ中央部に内蔵され、複数個の孔を通して自然対流循環し、界磁巻線が冷却される。

線(4.2K)への輻射熱侵入を低減するとともに、過渡時の回転子動揺に起因して超電導界磁巻線に侵入する1Hz程度の低周波磁束を電磁シールドする作用をもつ。したがって、低電気抵抗が得られるように無酸素銅を50K付近の低温で使用し、過渡電磁力による変形防止のために無酸素銅の両側を非磁性鋼で補強する3層構造を採用した。

トルクチューブに取り付けたらせん状冷却ダクトの両端で、ヘリウムガスに遠心力が発生するが、低温側のほうが大きいので差圧が生じ、自動的にヘリウムを循環させるSelf Pumping作用が働き、回転子への液体ヘリウムの給排が行なわれる。

3.3 空隙電機子巻線

図5に50MVA固定子の外観を、図6に固定子と電機子巻線の断面を示す。

発電機の界磁磁束密度が高くなるので、電機子巻線は在来機のような固定子鉄心スロット中ではなく、固定子鉄心内側の空隙中に配置される。そこで、端部に関係なく電機子巻線を同一直径の円筒状に製作でき、巻線全体として同じ支持構造が使用できるヘリカル巻(スキュー角180度)を採用した。

電機子導体に、界磁磁束が直接鎖交することによって導体に生ずる渦電流損を低減するために、素線径1mmの銅細素線を用いた。更に、並列電機子導体間の誘起電圧差に基づく循環電流損を低減するために、素線数本でより線を作り、このより線導体に従来のレーベル転位を施す二重転位方式を用いている。

電機子巻線電流密度の向上を図るため、単コイルごとの絶縁厚さを薄くし、不足分を相帯ごとのグループ絶縁で補う絶縁協調システムを採用した。

冷却法としては、ストランド間に挿入したステンレス製パイプに純水を強制循環させる間接水冷方式を用いた。固定子鉄心は鉄心間に埋設した水冷専用ダクトにより冷却している。

3.4 ヘリウム冷却システム

超電導回転子のヘリウム冷却システムには、100l/h液化機から2,000lデュワに蓄えられた液体ヘリウムが、発電機軸端のヘリウム給排部を通して回転子に供給され、回転子を冷却してガス化したヘリウムは、精製機を通して液化機に戻る閉ループシステムを採用した。デュワを使用するのは、ヘリウム液化装置が故障しても1日程度は液体ヘリウムを供給可能として、信頼性の向上を考慮したものである。

ヘリウム給排部は、液体ヘリウムを温度上昇することなく効率良く回転子に導入し、また、ヘリウムガスを汚染することなく回転子から排出させるものである。なお、ヘリウムのシール法としては、高速回転と軸振動を考慮して磁性流体シールを用いた。

4 試験結果

超電導発電機を試験ピット内に据え付けた後、保護カバーで覆い、計測はすべて制御室で行なった。

4.1 回転子試験

回転子は多重円筒構造をもち、反駆動側が二重軸受構造になるために、回転子の横振動特性が重要課題になる。バランス調整は、まず主要コンポーネント単体と常温での回転子回転試験により実施した。次に、予冷運転後の回転子内に液体ヘリウムを貯液した状態で回転試験を行なったが、バランス微調整だけで回転子は一次危険速度1,800rpmを超えて、3,000rpmで安定に回転した。

図7に、予冷運転中での超電導界磁巻線の温度低下特性を示す。予冷運転は回転子に熱収縮不平衡や真空リークが生じ

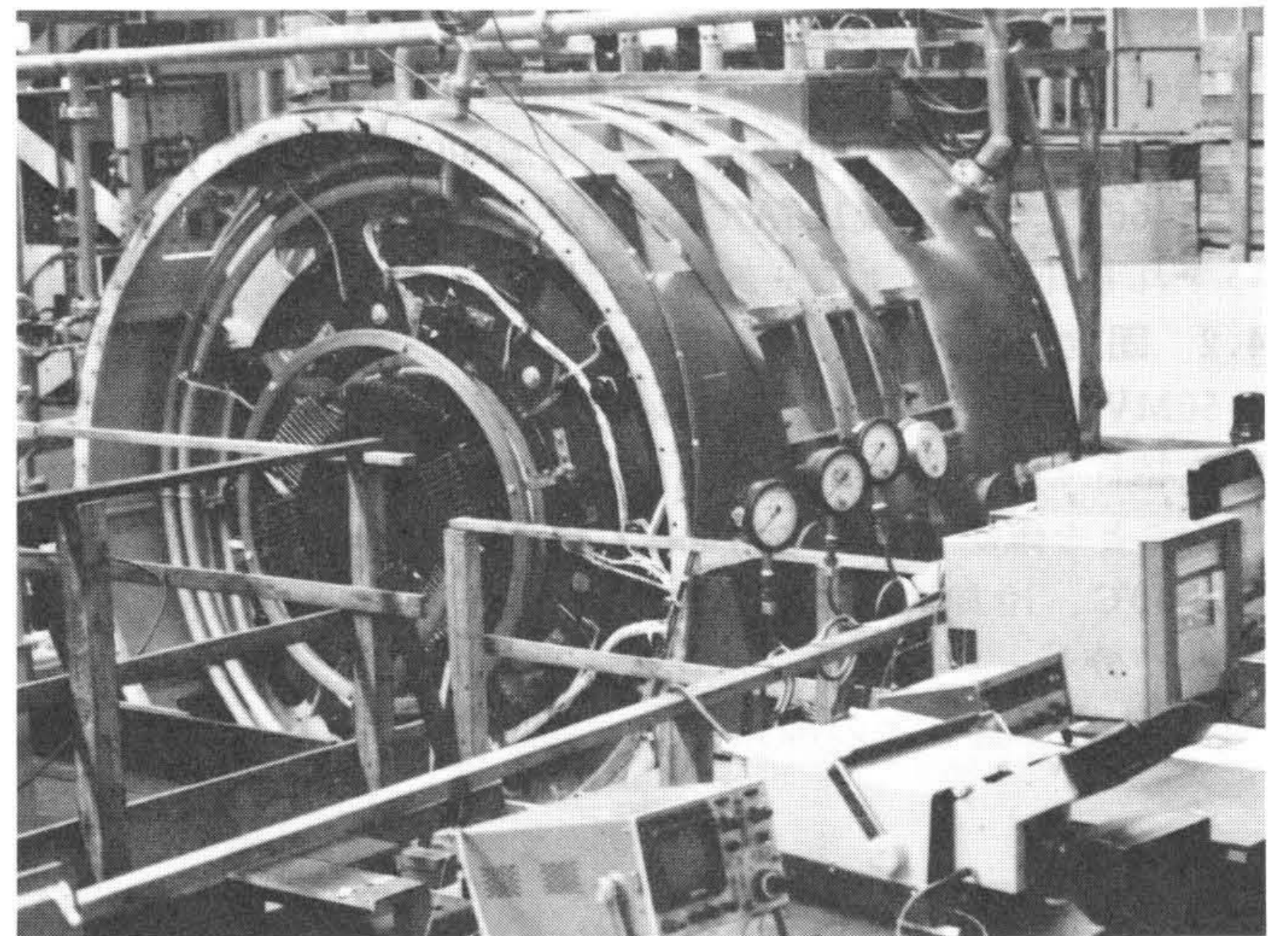


図5 50MVA固定子の外観 駆動側から見たもので、電機子巻線の1層目コイルと4層目コイル、2層目コイルと3層目コイルが接続される。外周側に固定子冷却用の水冷パイプが見える。電機子巻線冷却用の水冷パイプは反対側に取り付けられる。

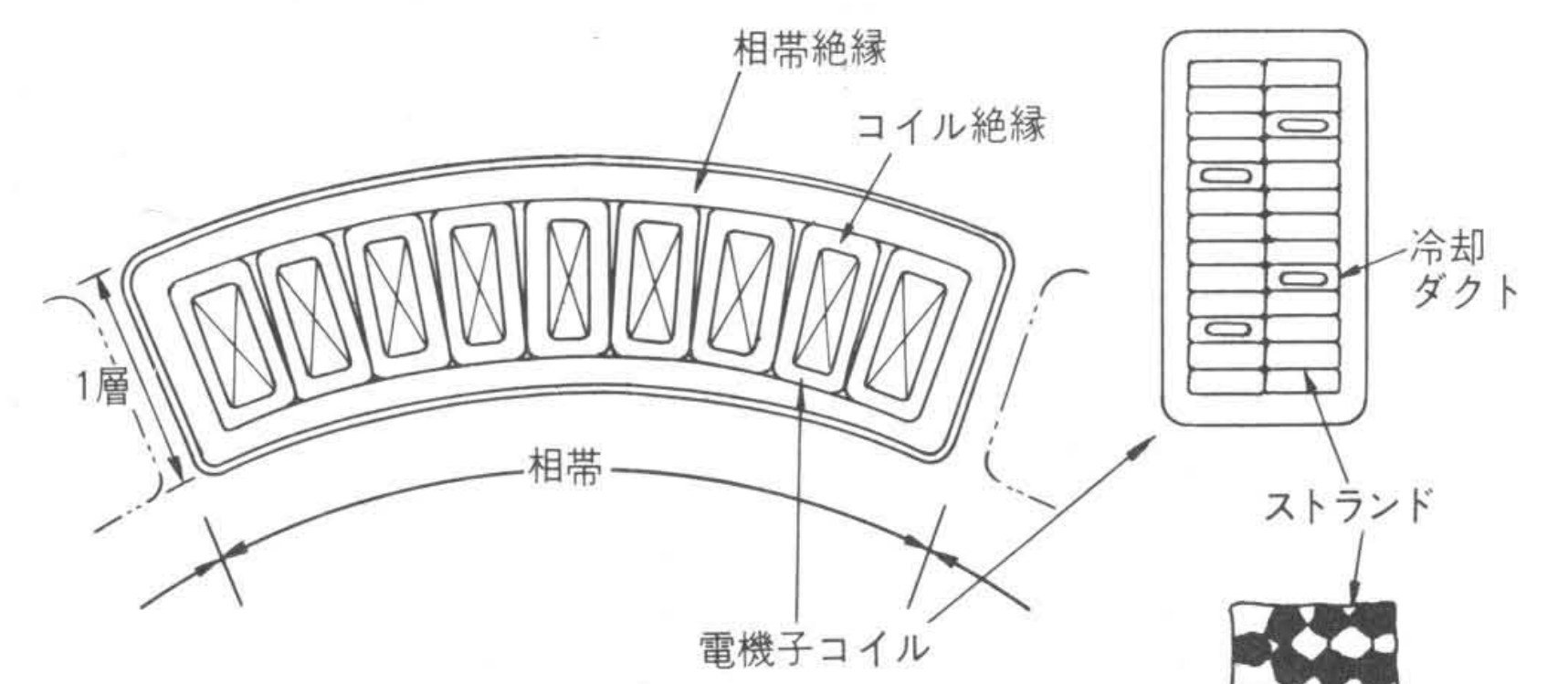
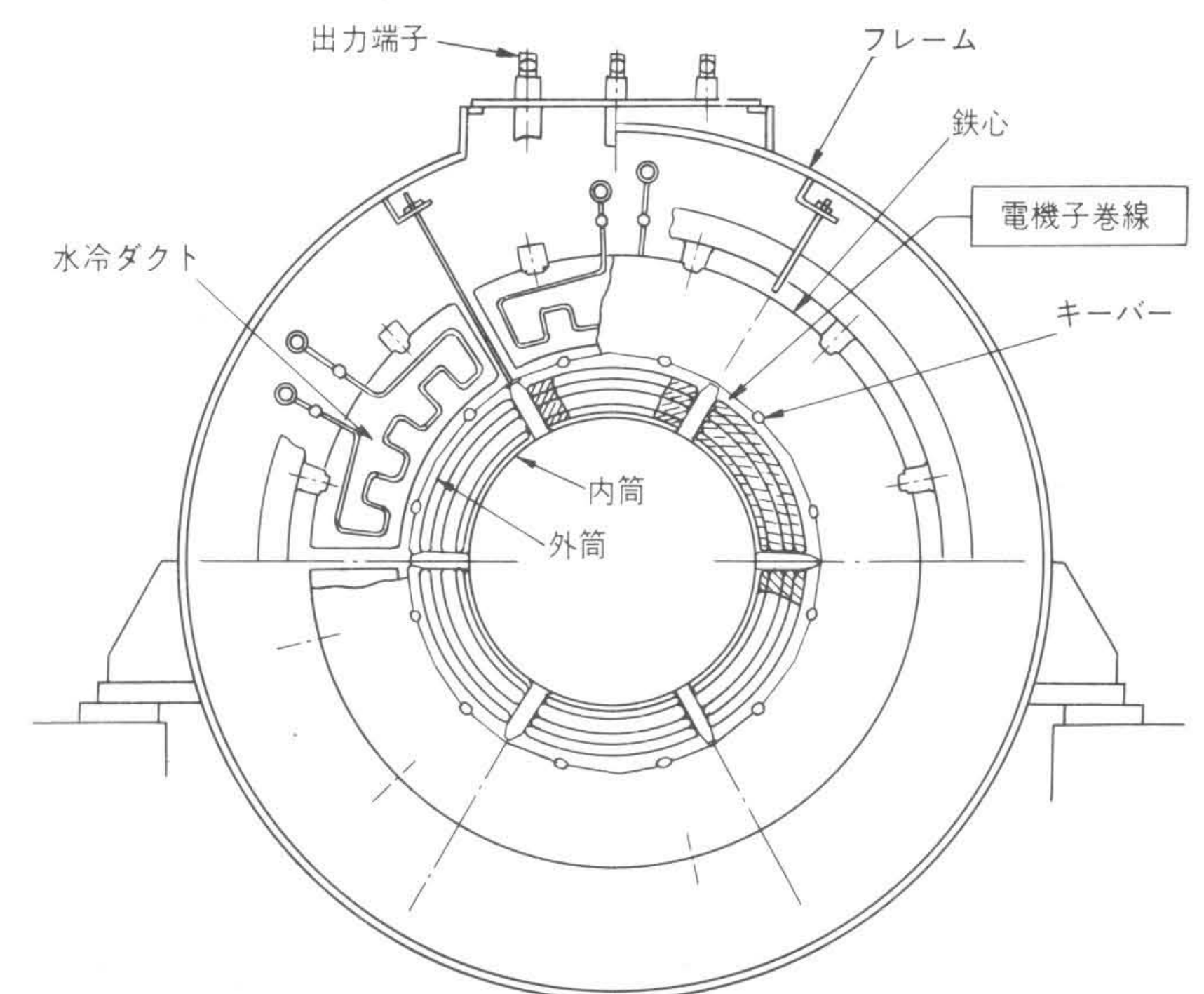


図6 固定子と電機子巻線の断面 1mm径素線の数本より線を成型したストランドにレーベル転位を施した二重転位導体を用い、相帯ごとにグループ絶縁を施す。4層電機子巻線が内周角形鉄心の角部を利用してフレームに支持される。

ないように低速回転(700rpm)させながら液体ヘリウムを徐々に供給(45l/h一定)して行なった。約35時間後に界磁巻線が超電導性を示し(電気抵抗が急激に減少することから判明)、その後液体ヘリウム供給量を100l/hに増加させて約2時間で回転子内の貯液が終了した。なおこのとき、トルクチューブは軸方向に8mm収縮した。

次に、50MVA超電導回転子と小形固定子を組み合わせて発電機の電気特性を測定した。図8に無負荷特性と三相短絡特性を示す。回転数3,000rpm、界磁電流800Aでの無負荷線間電圧1,460V、界磁電流128Aでの三相短絡電流1,420Aが得られ、いずれも計算値とよく一致することが確認できた。

4.2 固定子試験

50MVA固定子は単独で絶縁特性試験、外部電源励磁による温度特性と振動特性試験を実施し、定格50MVAに十分耐用できることを確認した。定格電流1,800Aで電機子巻線温度上昇は約40℃、冷却水温度上昇は約30℃と低く、十分余裕のあることが分かった。また、カロリー法で求めた巻線の渦電流損や循環電流損などの漂遊損は、極めて小さいことが確認できた。

5 今後の課題と展望

5.1 超電導発電機のメリット

図9に超電導発電機の構造上の特徴に基づくメリットと効果を示す。0.5～1.0%の発電機効率の向上は、毎年数億円の省エネルギーとなり、同期リアクタンスの大幅低下による電力系統安定度の向上は送電電力の増大に結びつく。更に、高電圧化により昇圧変圧器が省略できる可能性をもつなど、超電導発電機は魅力ある次世代の大容量発電機と言える。また、超電導マグネット、ヘリウム液化機、高電圧回転機などへの波及効果も期待できる。

経済性については、超電導発電機が開発段階であるため評

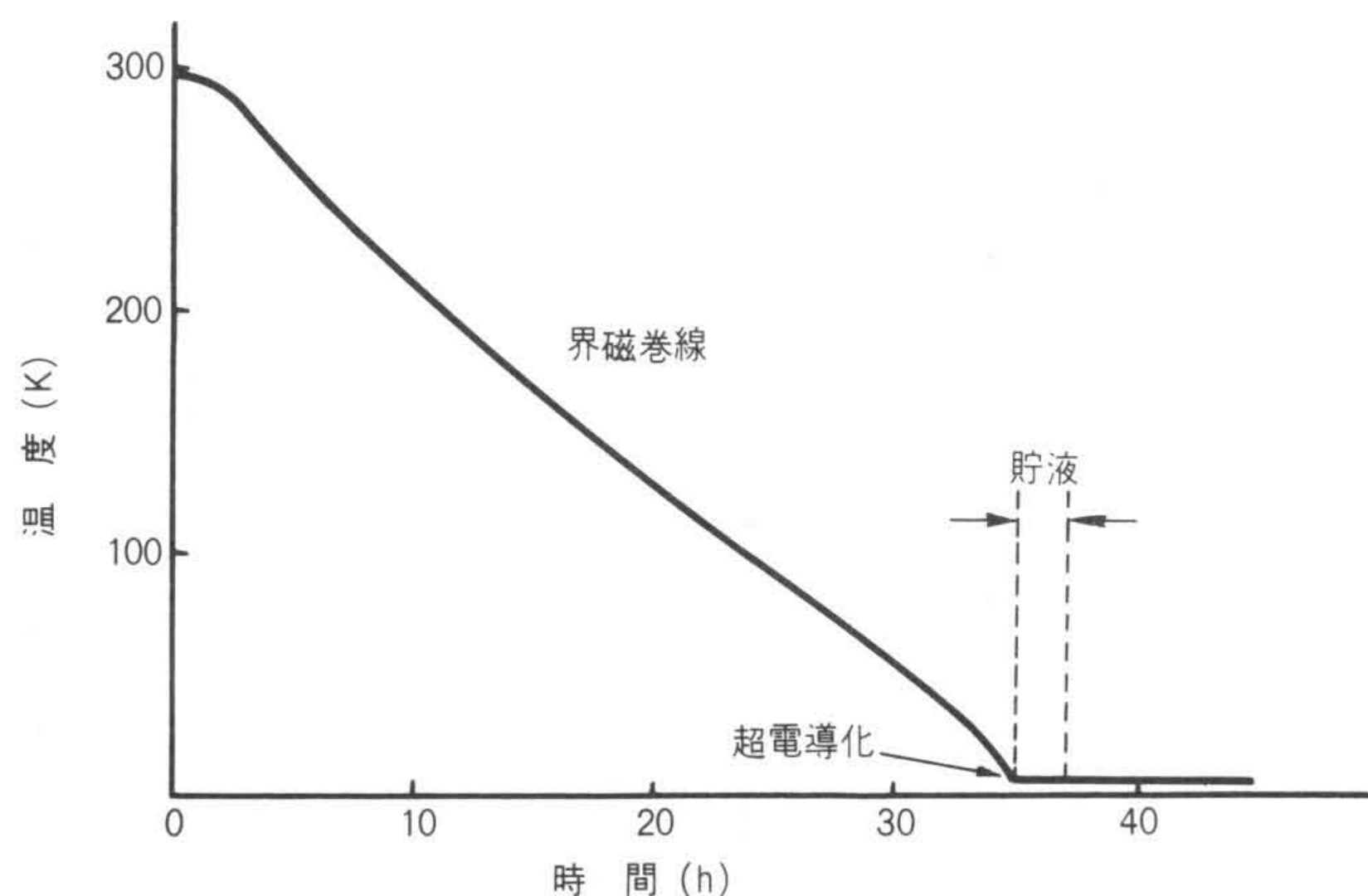


図7 予冷特性 回転子速度700rpm、液体ヘリウム供給量45l/h一定で予冷運転を行ない、35時間後に界磁巻線抵抗が急減少し超電導性を示した。

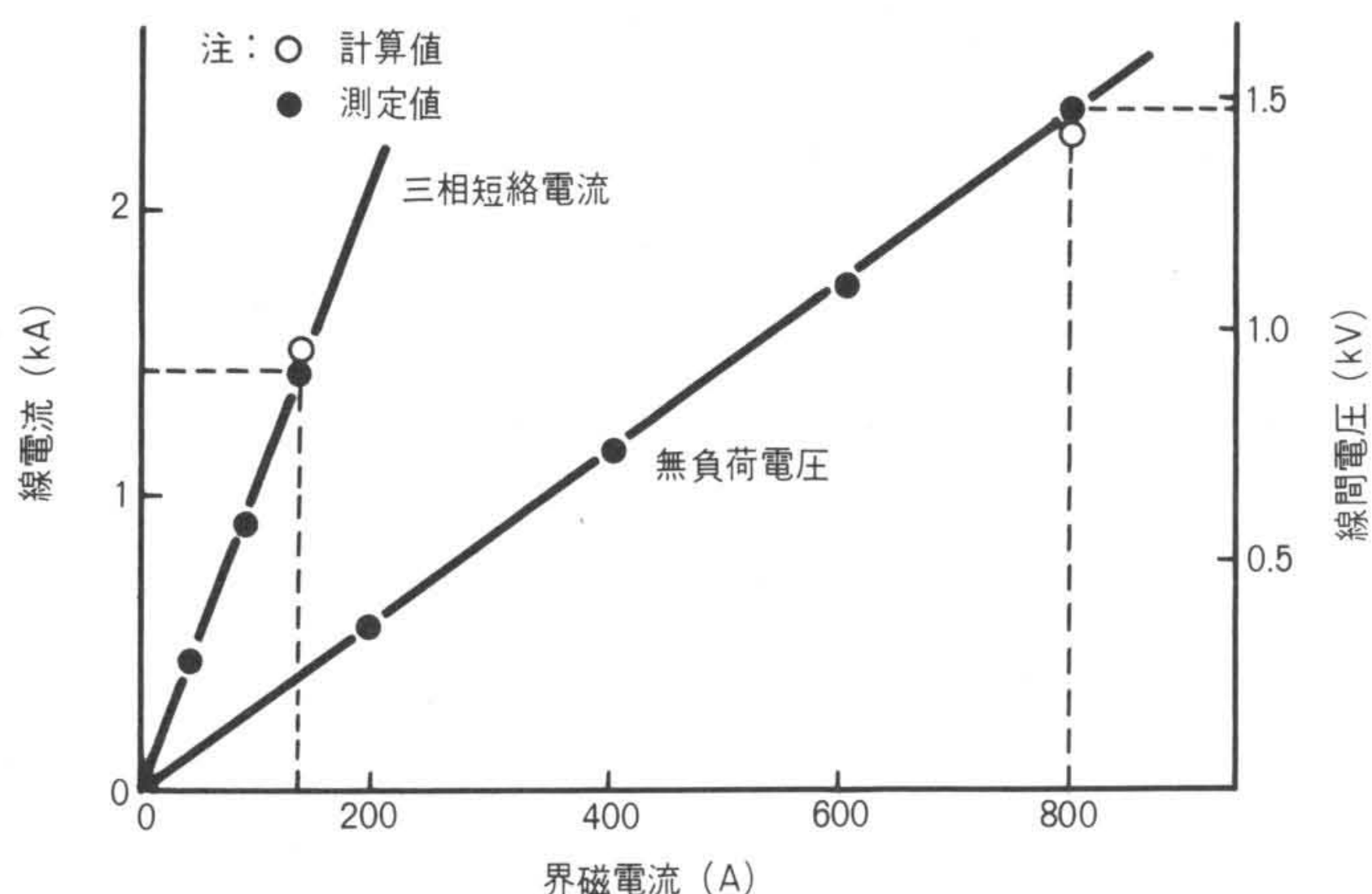
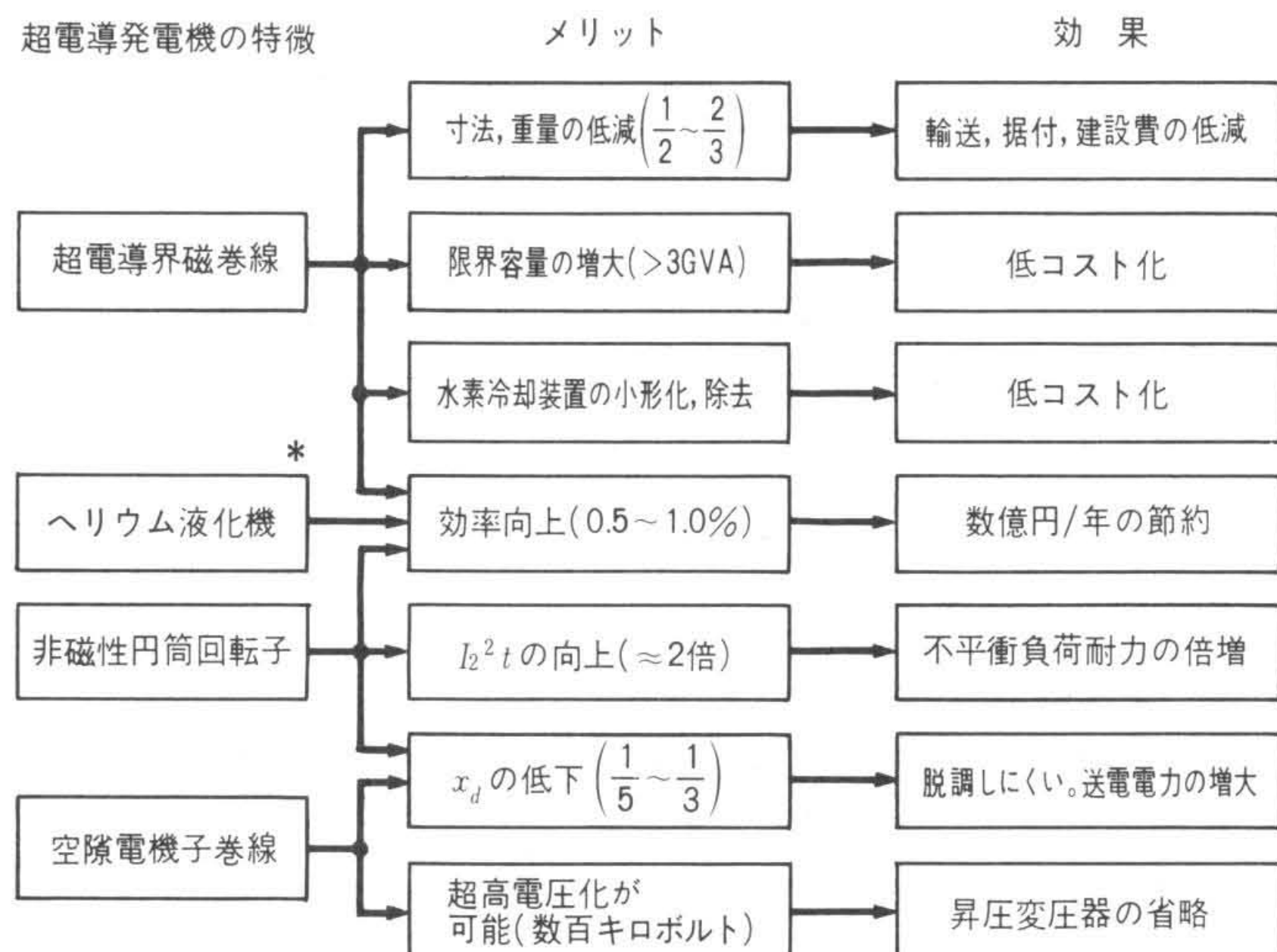


図8 定常電気特性 無負荷電圧特性、三相短絡電流特性は共に計算値とどりの実測結果が得られた。

超電導発電機の特徴



注：* コスト、据付け場所の点でデメリット

図9 超電導発電機のメリットと効果 ヘリウム液化機の消費電力を考慮しても発電機損失が約1/2となり、大きい効率向上効果が得られる。

価しにくい面があるが、発電機製作費用と効率向上効果を考慮すると、300～1,000MVAがクロスポイントになり、これ以上の容量に対しては超電導機が有利であると思われる。

5.2 実用機の開発

図9に示すように超電導発電機は効率向上、電力系統安定度向上効果など大きいメリットをもっているもので、近い将来にタービン発電機の主流になることも考えられる。この立場に立って、アメリカ、ソビエト、西ドイツは300～400MVA実用機を開発中であり、これらのフィールド試験により在来機並みの信頼性が確認できれば実用化段階に入るとと思われる。我が国も世界に遅れをとらないように、早期に300～500MVA実用機の開発を進める必要がある。

6 結 言

50MVA級超電導発電機の概要、主要コンポーネントの特徴及び試験結果について述べた。予冷運転は37時間という短い時間で順調に終わり、超電導回転子は3,000rpmで安定に回転し、定常及び過渡電気特性が把握できた。

アメリカ、ソビエト、西ドイツは超電導発電機が次世代の大容量発電機になるとの考えに立って、300～400MVA機の開発を進めており、我が国もこれら諸国に遅れを取らないように実用機の開発に早急に着手する必要がある。

終わりに、50MVA級機の製作及び試験に御協力をいただいた関係各位に対し、深謝の意を表わす次第である。

参考文献

- 1) I.A.Glebow, et al.: Superconducting Turbogenerators-Current Situation and Prospects, 1982, CIGRE paper, No.11-14 (Sept. 1982)
- 2) L.Intichar, et al.: Technical Overview of the German Program to Develop Superconducting AC Generators, IEEE Transactions, Vol. MAG-19, No. 3, pp. 536～540 (May. 1983)
- 3) H.Kaminosono, et al.: Development of Superconducting Synchronous Machines in Japan, 1982 CIGRE paper No. 11-02 (Sept. 1982)
- 4) 牧, 外: 50MVA級超電導発電機の開発, 電気学会静止器研究会, SA-82-19 (1982-11)