

# 超電導発電機の開発

## Development of Superconducting Generators

超電導発電機は、効率向上、機械寸法の小形化、安定度の向上などが期待されるため、次代の新形発電機として世界的に脚光を浴びつつ開発が進められており、発電機の大容量化に伴い近い将来実用機が運転されるものと考えられる。日立製作所はこれに対処して発電機回転子のコンポーネント研究に着手して以来、超電導発電機の開発を総合的に推進してきた。

本論文では、この新しい発電機の技術的特長や、現在開発を進めている50MVA機の概要、電気的・機械的特性、冷却性能の研究経過、空隙巻線固定子の概要などについて述べるとともに、従来機に代わるべき新形機としての超電導発電機の開かれた将来性を予想してみる。

実松俊弘\* *Toshihiro Sanematsu*  
 牧 直樹\*\* *Naoki Maki*  
 尾形久直\*\*\* *Hisanao Ogata*  
 渡部正敏\*\* *Masatoshi Watanabe*

### 1 緒 言

タービン発電機の単機容量は、過去の経済成長とともに飛躍的に増大してきたが、これは主として発電機冷却法の改善によって達成されてきたものであった。近年になって超電導発電機が注目され、世界各国で試作研究が進められているが、これは、回転子巻線の無損失化、高磁束密度化などによって単位体積当たりの出力を非常に大きくできるためであって、その結果、発電機の製作限界容量が大幅に拡大できるとして大きな期待が寄せられており、また、効率や安定度も向上し機器寸法も小形化できるために、大容量機だけでなく、広い範囲で使用される可能性があると言われている。アメリカでは20MVA機が製作を完了し300MVA機の製作準備に入っており、ソ連、西ドイツでも300~1,000MVA機が計画されている<sup>1),2)</sup>。図1は世界の超電導発電機の開発状況を示したものである。この論文では、以上述べたような超電導発電機の技術的特長について触れ、現在日立製作所で開発中の50MVA機の内容を紹介し、関係者の参考に供したい。

### 2 タービン発電機の大容量化と超電導発電機

発電機は単機容量の増大とともに冷却方法の改善が行なわれ、空気冷却→水素冷却→水冷却という経緯で機械寸法の大幅な増大を抑えてきたが、固定子コイル、回転子コイルとも直接水冷却する現在の最も進んだ冷却方式でも、二極機で1,600~2,000MVA、四極機で2,500~3,000MVAが限界と言われており、これを制限する要素としては、もはや冷却能力ではなく二極機では軸長・振動、軸径・応力であり、四極機では巨大な軸材の入手難、輸送制限であると言われている。発電機の単機容量は、経済の成長とともに飛躍的に増大してきたが、近年になって、大容量化も頭打ちという傾向が世界的にみられている。しかし、発電所建設用地の入手難などの立地条件や、タービン側からの理由としてクロスコンパウンド形よりはタンデム形のほうが経済上、運転効率上一般的には有利とされるなどの点から、やはり将来の発電機単機容量は増大傾向になることは必須であり、そのためには上記のような理由で制限される限界容量を拡大するためにも、発電機を高出力密度化し、小形化していく必要があると考えられる<sup>3)</sup>。

この大容量・高出力密度形発電機に適しているのが、回転子に超電導線を使用した超電導発電機である。超電導発電機

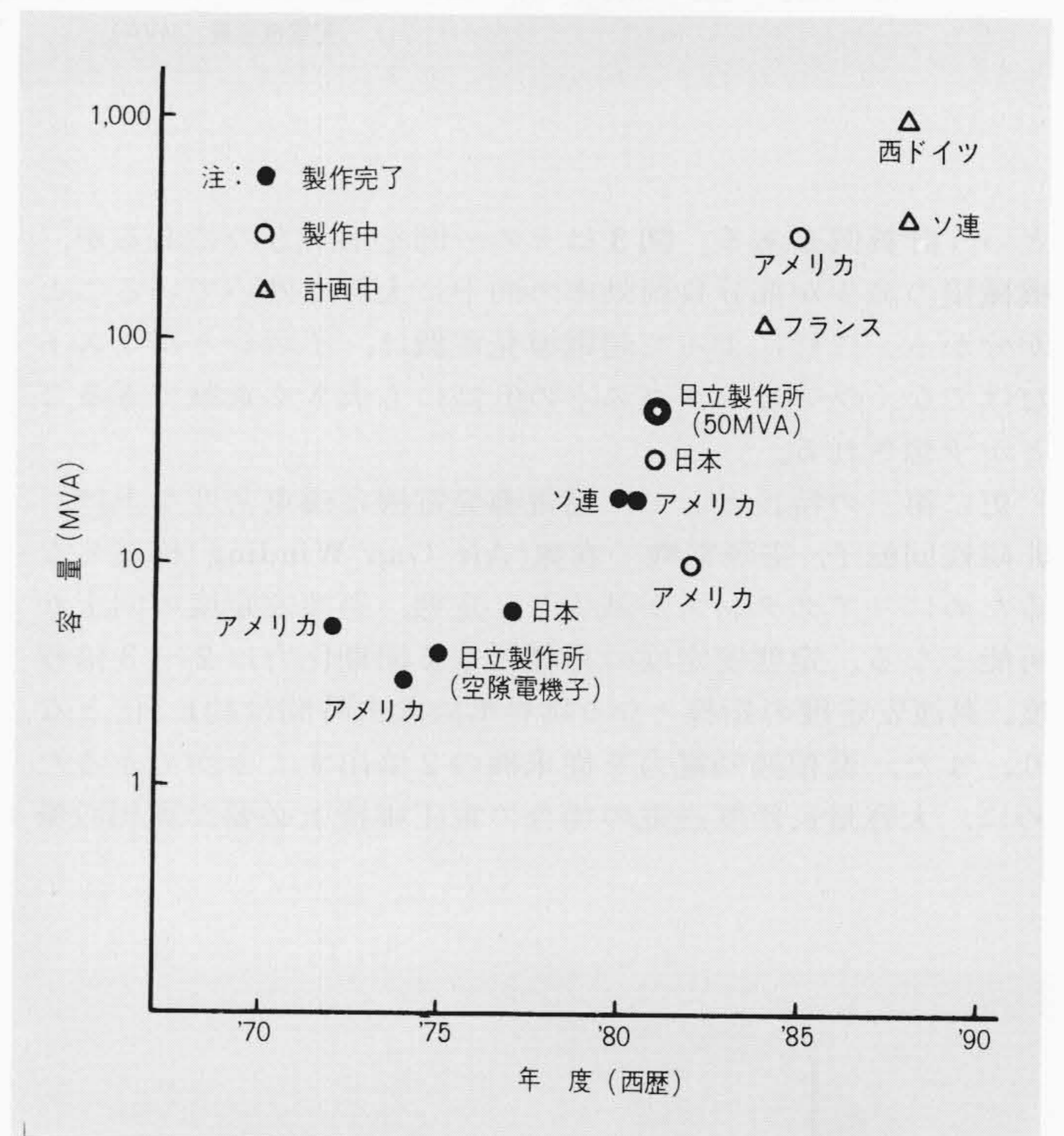


図1 超電導発電機の開発状況 1990年代には1,000MVA級の開発に入るものと予想される。

の第一の特長は、図2に示すように発電機の単位体積当たりの出力を非常に大きくとることが可能なことで、現在の固定子直接水冷却、回転子直接水素冷却方式に比較すると、その出力係数は2倍以上になると言われている。このために、機械寸法、重量が小となり高級材料の入手が容易となるばかりでなく、建屋や基礎の合理化、輸送費用の低減が可能となり、また実用性が十分確証された暁には現在の機械に比べて、発電機自身の経済性も大きく向上させることができるであろう。

第二の特長は、無損失界磁巻線となること、回転子寸法の縮小などによる機械損の低減が可能となることにより、効率が改善されることで、全負荷効率で0.5~1.0%の改良が可能

\* 日立製作所日立工場 \*\* 日立製作所日立研究所 \*\*\* 日立製作所機械研究所

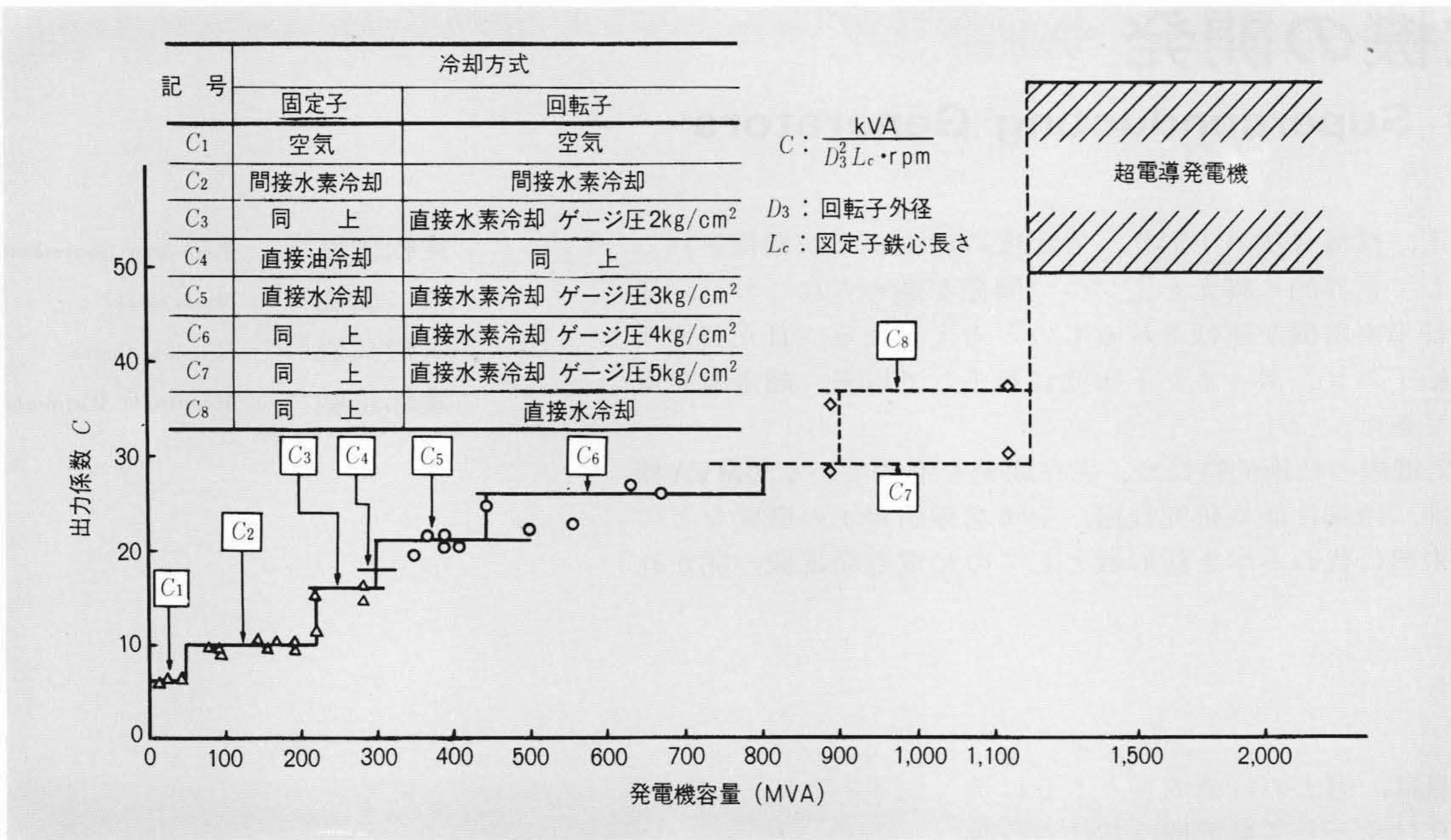


図2 発電機の出力係数  
従来の固定子直接水冷却、回転子直接水素冷却形発電機と比較して、超電導発電機の単位体積当たりの出力は2倍以上となる。

という計算例もある。図3はその一例を示すものであるが、機械損の減少が部分負荷効率の向上に大きく効いていることが分かる。これによって超電導発電機は、イニシャルコストだけでなくランニングコストの低減にも大きく貢献できることが予想される。

更に第三の特長として、超電導発電機は磁束密度を上げ、非磁性回転子、空隙電機子巻線(Air Gap Winding)構造となるためにリアクタンスが減少し、定態、過渡安定度の向上が可能となる。定態安定度の指標となる同期化力は2~3倍程度、過渡安定度の指標となる臨界事故除去時間は約1.5倍となり、また、進相無効電力を従来機の2倍出すことができるために、大容量長距離送電の場合の電圧維持上必要な調相設備

としても利用することができ、そのメリットは極めて大きなものがある。

以上述べたように、超電導発電機には幾つかの大きな特長があるが、欠点としては回転子への熱侵入や変動磁束の侵入を防止するための多重円筒構造が採用されるために構造が複雑となり、機器の信頼性の面で解決してゆかねばならぬ問題が幾つかあることである。世界的にもまだ比較的小形の試験機の開発段階であり、今後変動磁界に強い化合物系超電導線材の開発や、高速回転に耐えられる界磁巻線構造、電気的熱的シールド構造など、機器の信頼性に直接影響を与える重要な開発項目が残されており、これらを一つ一つ確認してゆかなければならないが、機器の小形化と0.5%以上の効率の改善が期待されることから、省エネルギーの見地から大容量機に限らず適用される可能性があり、特に寸法的な制約のある船舶や航空機用への応用にも大きな期待が寄せられている。

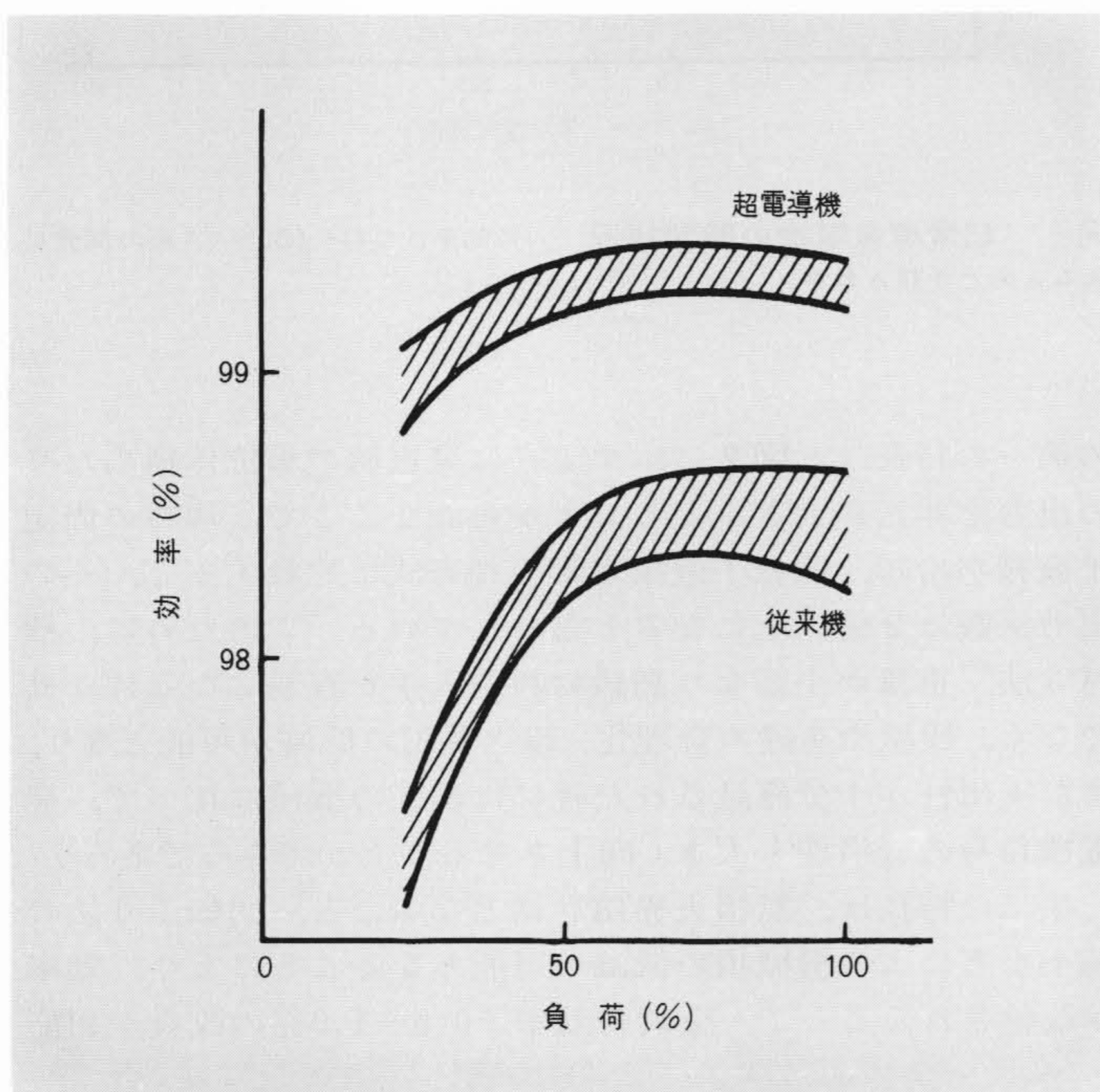


図3 超電導発電機の効率  
機械損が小さくなり、部分負荷効率の改善も大きい。

### 3 50MVA機の概要<sup>4)</sup>

現在、日立製作所で開発を進めている50MVA超電導発電機の構造を図4に示す。

回転子は高磁界を発生させる超電導界磁巻線、それを支持する極低温円筒トルクチューブ、回転子にヘリウムを供給、排出する給排装置、電機子反作用交流磁束から超電導界磁巻線を電磁的にしゃ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。また、固定子は高空隙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ヘリウム液化装置、超電導界磁巻線を励磁する直流電源が設けられる。また、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になるので、回転子は多重円筒体を形成し各円筒体間に真空層を設けて断熱する。

超電導コイルは、送電系統事故時にもクエンチ(常電導転移)しないことに重点をおき、超電導コイルに発生する摩擦損失や交流損失を極力低減するように、くら形集中巻きに樹脂含浸した界磁巻線をバインド支持するとともに、内外二重のシールド方式を用いている。

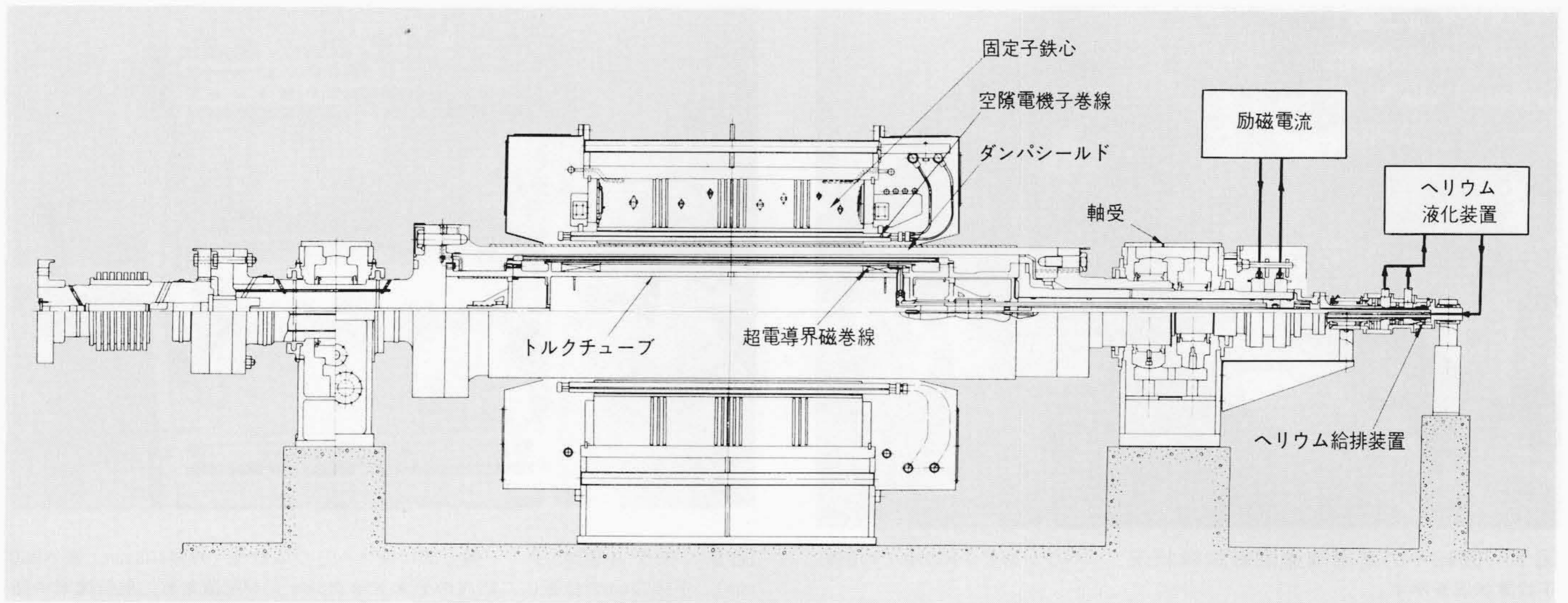


図4 50MVA超電導発電機の構造 体格50MVA, 外径600mm, 軸受スパン3,900mmの回転子は, 4~5Kの液体ヘリウムの自然対流により冷却される。

トルクチューブには, 極低温での強度, 靱性の高い非磁性鋼を用いるとともに, 常温ダンパシールドとの軸方向熱収縮差を許容するために反駆動側にダンパシールドとトルクチューブを別々に支持する二重軸受を採用した。また, 常温ダンパシールドには銅合金を高強度非磁性鋼で補強した2層構造, 低温輻射シールドには無酸素銅の内外周を非磁性鋼で補強した3層構造としている。

以上の特徴をもつ50MVA超電導回転子の各部品に発生する最大応力を表1に示す。界磁巻線支持用バインドには, コイル間電磁力, 遠心力及び温度変位を考慮して定まるプリテンションに, 回転と極低温励磁に伴う応力が加わり高応力が発生する。また, ダンパシールドには過渡時に大きな電磁力が発生するので, 材料と構造選定及び製法に十分注意を払う必要がある。

次に, 50MVA超電導回転子各部品の形状及び性能について述べる。

図5の超電導界磁巻線には, 1.8mm×2.6mm平角Nb・Ti・Zr多心線(フィラメント: 40 $\mu$ m×640本, 銅比: 4.5)が使用された。この超電導界磁巻線をトルクチューブに設けられたくら形スロットに挿入後, その外表面から非磁性鋼バインドを巻き堅く固定する。トルクチューブと界磁巻線内周部間には短冊状絶縁スペーサが多数取り付けられ, 液体ヘリウムの流

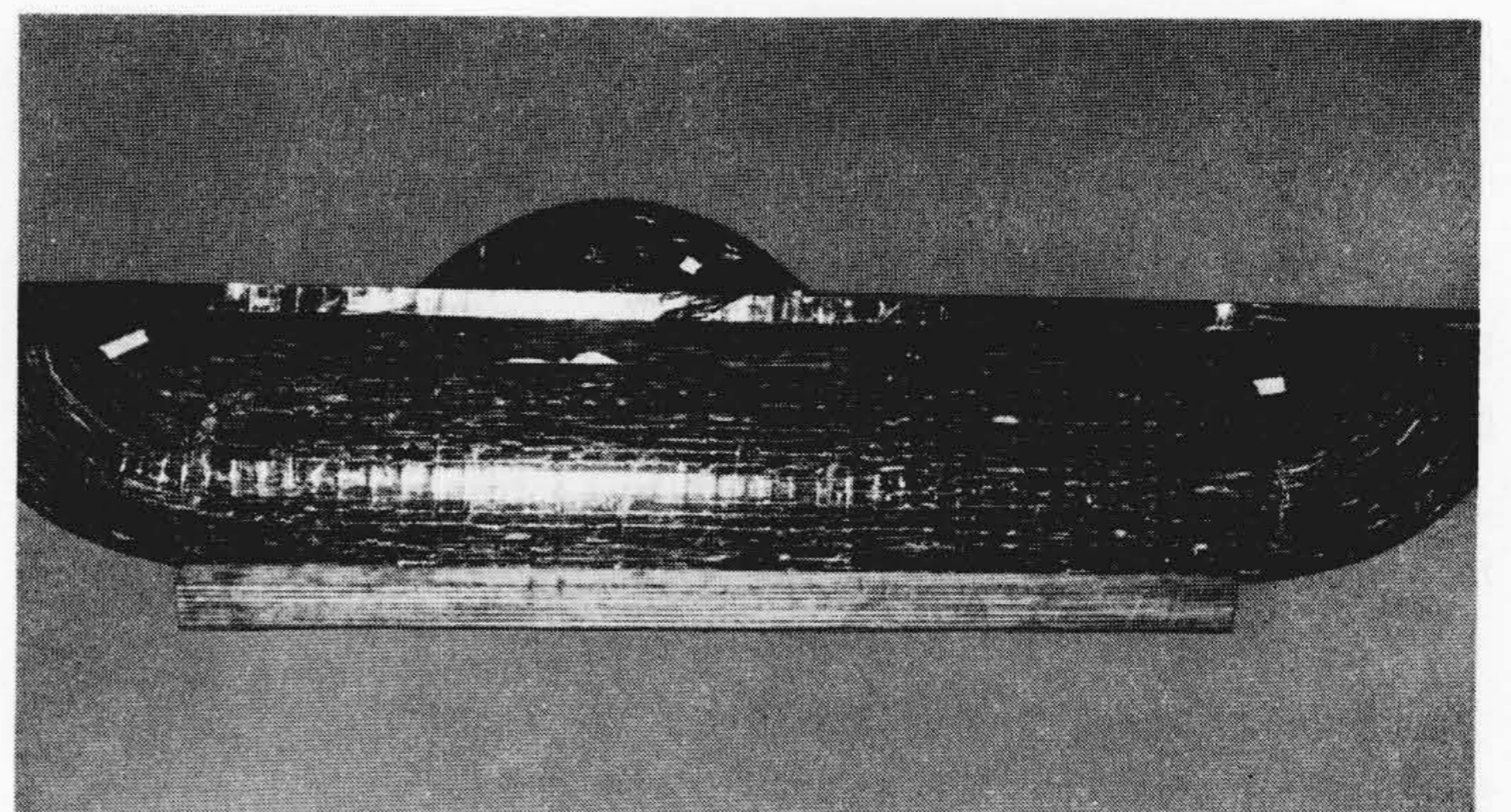


図5 超電導界磁巻線の外観 内径0.34m×外径0.4mのくら形集中巻きコイルがエポキシ樹脂で一体含浸された。

表1 50MVA超電導回転子に発生する最大応力 回転子各部品には遠心力, 熱応力, 電磁力及びトルクによる合成応力が加わる。この応力は, 使用材料の強度からみて安全な値となっている。

コンポーネント	材 料	温 度 (K)	最大応力 (MPa)
トルクチューブ			
中 央 部	非磁性鋼	4.2	100
中 間 部	"	4.2~40	170
端 部	高強度非磁性鋼	40~300	240
バ イ ン ド	"	4.2	400
ベ ッ セ ル	非磁性鋼	4.2	100
輻 射 シ ー ル ド			
主 要 部	無酸素銅	40	130
支 持 部	非磁性鋼	40	170
ダンパシールド			
主 要 部	銅合金	300	210
支 持 部	高強度非磁性鋼	300	360

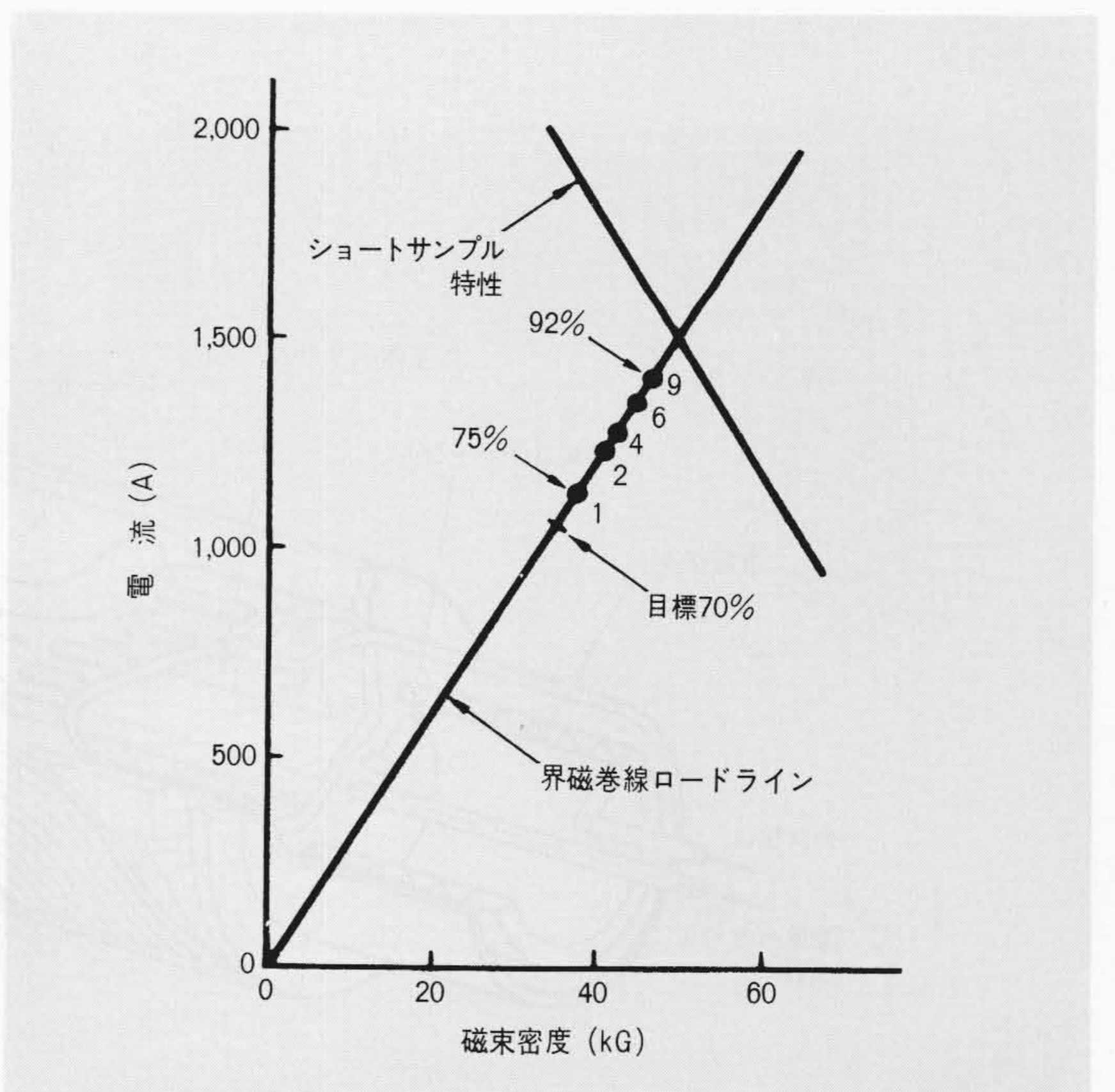


図6 超電導界磁巻線の励磁特性 トレーニング効果(励磁回数を繰り返すことにより, 超電導臨界電流が上昇していく。)が見られるが, 目標値70%を十分満足した。

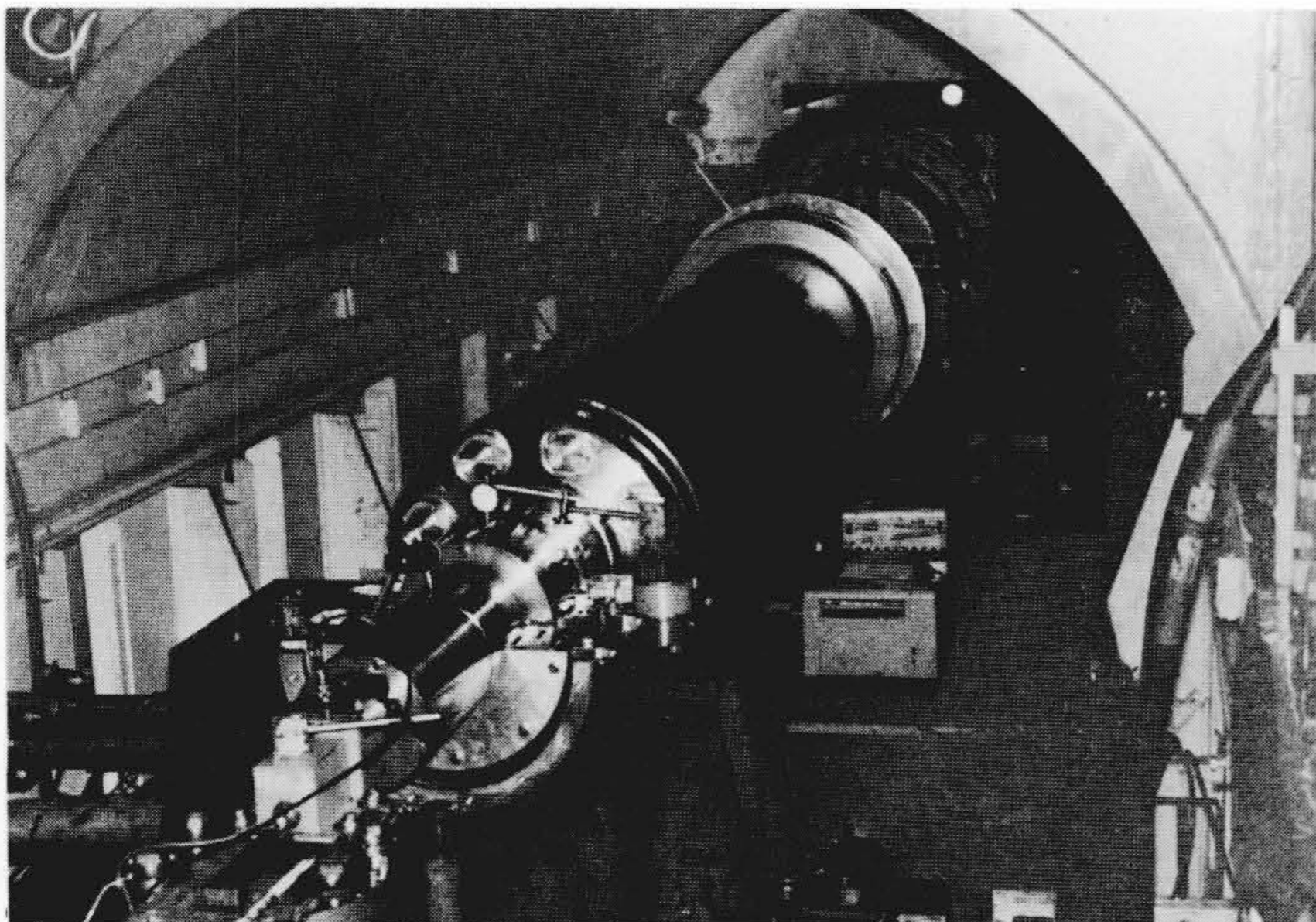


図7 回転子の常温高速回転試験状況 バランスピットの中での回転子設置状況を示す。

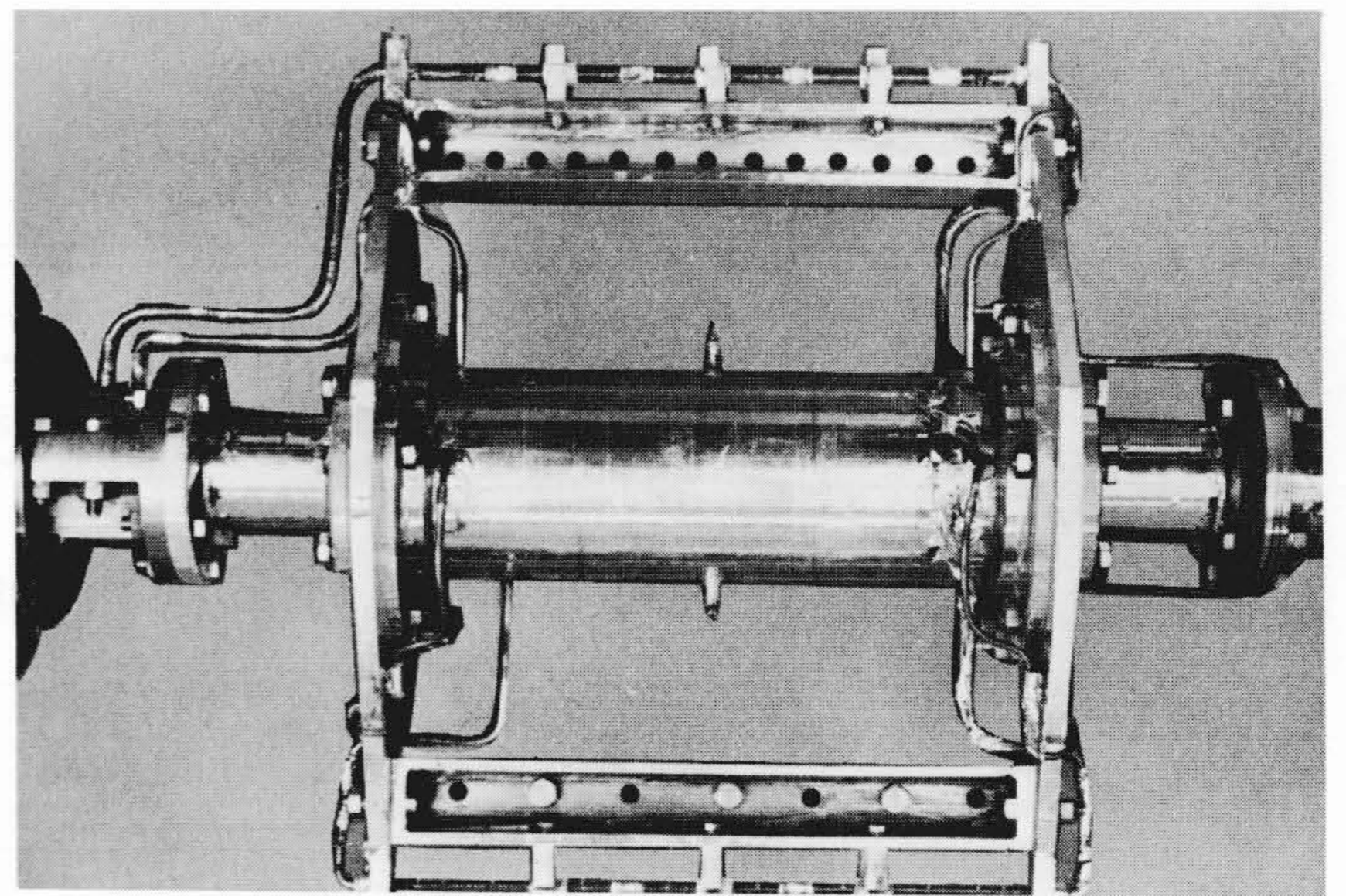


図9 モデル回転子 軸心部に液体ヘリウム貯槽(外径108mm, 長さ360mm), 半径25cmの位置に二組みのテストセクションが配置され, 熱伝達率や循環流速が測定される。実験時は, この回転子を真空容器の中に入れて回す。

路形成と界磁巻線の対地絶縁を構成する。また, トルクチューブと界磁巻線側面間にはFRP(ガラス繊維強化プラスチック)及びエポキシ系スペーサを埋め込み, コイルの動きをなくする。こうして製作した界磁巻線部を, 静止クライオスタット内に挿入して行なった励磁実験結果を図6に示す。1回目の励磁実験で短尺特性(小形モデルでの特性)の75%に達し, トレーニング効果を経て最終的に9回目の励磁実験で92%を達成した。これは運転動作点である目標値70%を十分満足するもので, 実用に供する目途が得られた。

回転子は柔軟な多重円筒構造で, かつ反駆動側が二重軸受構造になり, 回転子の振動特性は重要課題となる。そこで, まず図7に示すように常温状態で高速回転試験を実施し, バランス調整の後, 3,000rpmで順調に回転した。一次危険速度は約2,000rpm, 二次危険速度が3,600rpm以上になることが確認できた。

#### 4 回転子冷却系

##### 4.1 冷却方式

超電導回転子の冷却方式には, 大別して強制流動方式と浸せき冷却方式があるが<sup>5)</sup>, 日立製作所では熱侵入をうまく利用して自然循環ループを形成し, 浸せき冷却に強制流動の特徴を加味した新しい冷却方式を開発した。図8は, 日立製作所が50MVA機に採用した回転子冷却構造の概念図である。冷却流体としての液体ヘリウムは, 熱サイホン効果によりトルクチューブの内周側と外周側を連通する幾つかの孔を通じて, 冷却流路を中央部から両端部へ広がるようにして流れる。この流動の原理を水を使った可視化モデルで確認する一方<sup>6)</sup>, 遠心力場での液体ヘリウムの伝熱と流動を把握するため, 図9に示すようなモデル回転子を製作した。実験の結果, 解析とほぼ良い一致を見た<sup>7)</sup>。

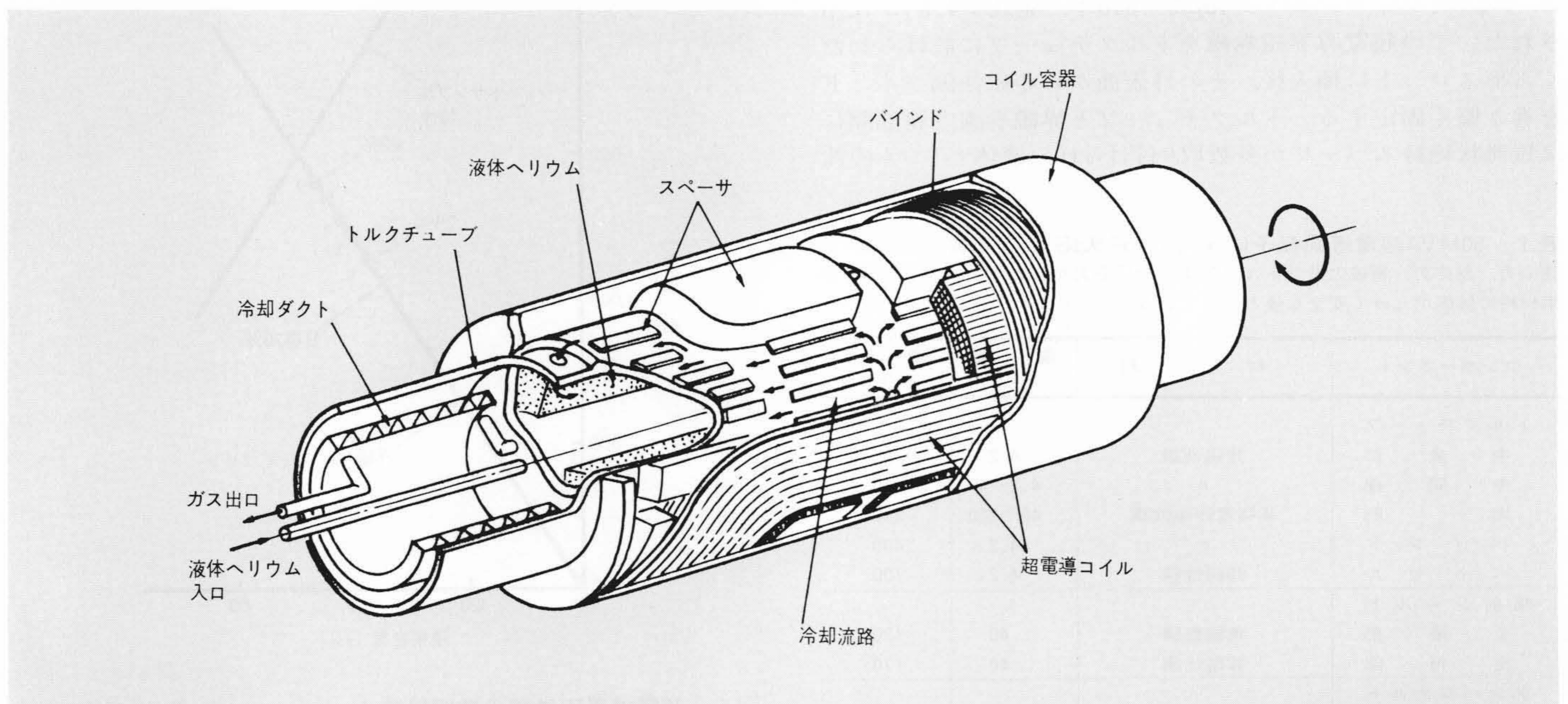


図8 超電導回転子の内部構造 軸心部から液体ヘリウムが供給され, トルクチューブの内周側に液体が蓄えられる。トルクチューブの外周側にスペーサによって冷却流路が構成され, その外周にくら形超電導コイルが巻かれ, これらがコイル容器に収納されている。

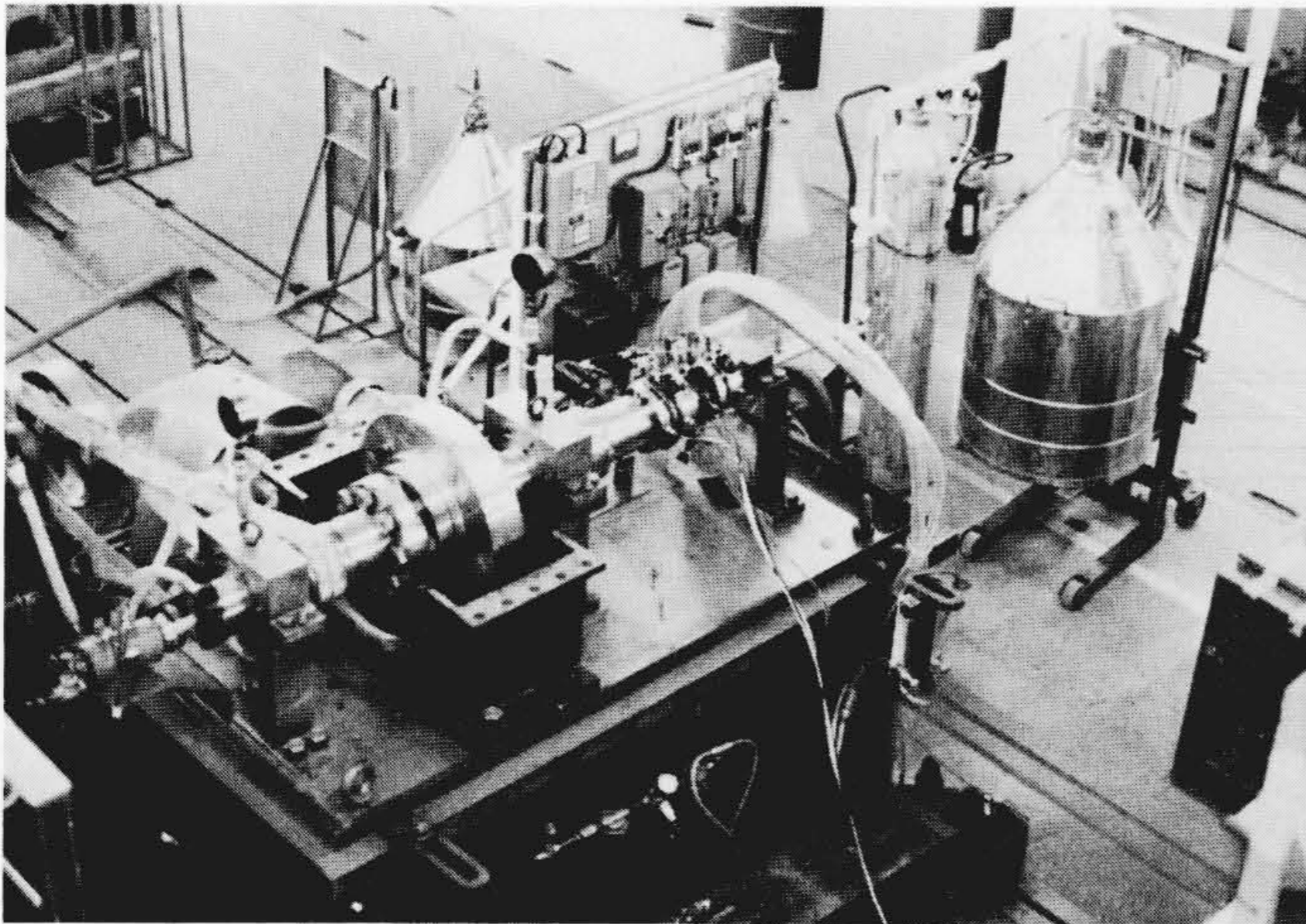


図10 ヘリウム給排機試験装置 右手の液体ヘリウムデュワーから中央左寄りの回転円板部に液体ヘリウムを供給して、侵入熱やシール圧力を測定する(回転数3,600rpm)。

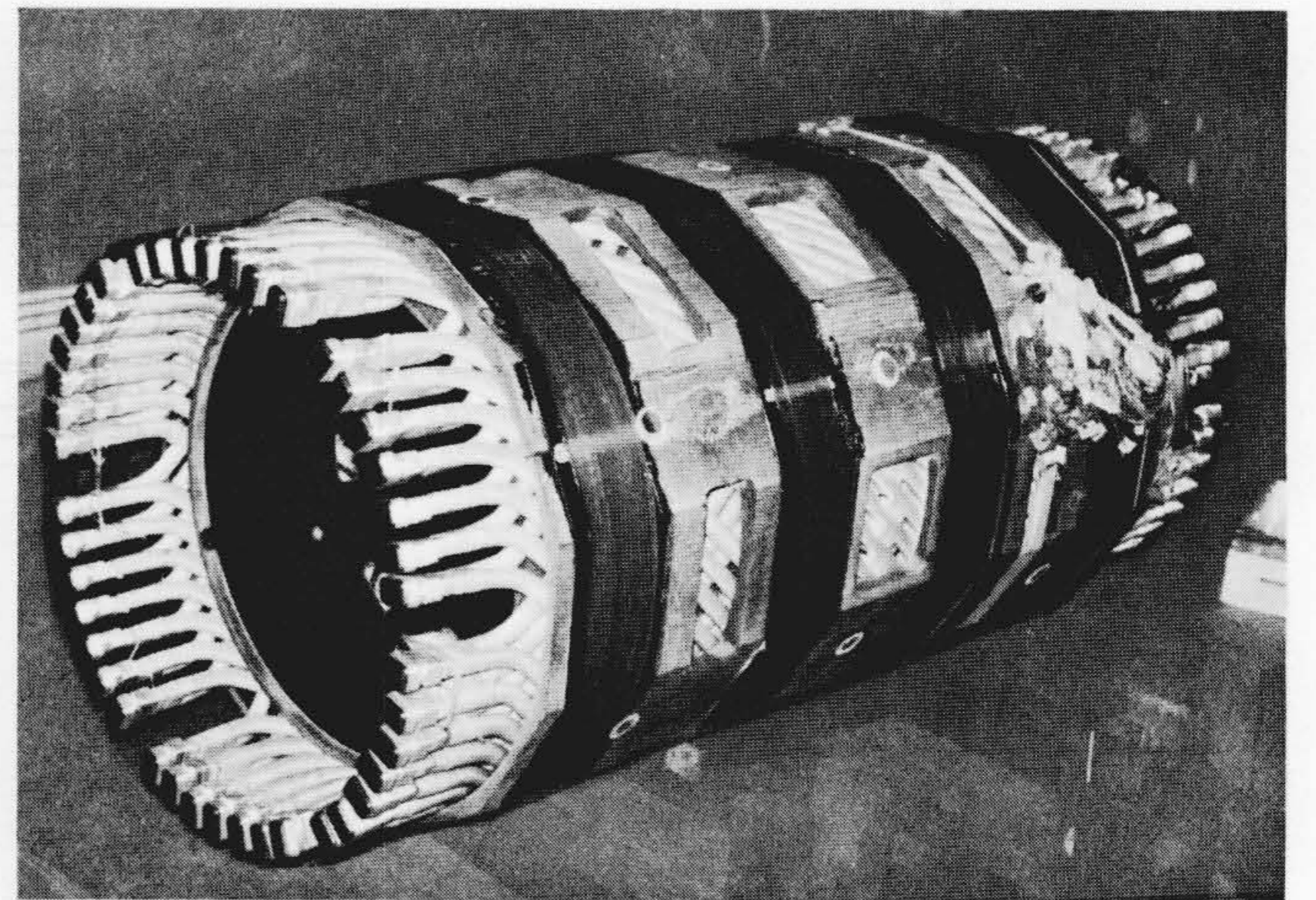


図11 完成したスキュー巻線電機子 スキュー巻電機子巻線の外周にサポートブロックがガラスバインドで固定されている。サポートブロック外周の多角形部を、鉄心内周に弾性部材を介してフィットさせることにより鉄心に固定される。

## 4.2 ヘリウム給排機

回転子への液体ヘリウムの供給排出部は、低温流体をシールし、かつ侵入熱を小さくする必要があるため、特殊な工夫がなされている。日立製作所では、従来使用されている磁性をもつ液体を狭い間隙に高磁界下で保持し、シール作用を持たせる磁性流体シールに、軸の回転に伴う遠心力によって液体をシール空間に保持する遠心シール構造を加味し、軸振動に対し安定性の高い給排機を開発した。図10に50MVA機用の試験装置を示す。試験の結果は、軸振動が0.1mmでも問題はなく、侵入熱も1~2Wと満足できるものであった。

## 4.3 計測系

温度、液面、ひずみ、磁界など100点を超える各種の計測を行なうために、日立製作所では回転子内部に切換回路を内蔵する計測方式を開発した。切換回路は、ホトトランジスタ、半導体スイッチ、増幅器から構成され、スリップリングにより静止系に取り出された信号は、データプロセッサを経て処理表示される。

## 5 空隙巻線固定子<sup>8),9)</sup>

空隙巻線固定子では、空隙磁束の大部分が巻線と鎖交するので、巻線導体のうず電流損及び循環電流損が従来のスロット巻線より著しく増加し、巻線に働く電磁力は数倍から10倍以上にも達する。したがって、導体損失を低減し、巻線部を限られた空間にいかにか高固かつ高密度に配置するかが最大の課題である。この問題は現在のスロット巻線製作技術の単なる延長では難しく、超電導発電機の開発に大きな影響を及ぼすものと言える。

### 5.1 細素線転位導体の開発

空隙巻線用大容量電機子導体では、導体損失を現在のスロット巻線と同程度に抑えようとすると、一般に寸法1mm前後の絶縁細素線を二重あるいは三重に転位することが必要になる。このため、コイル内部に占める絶縁物及び転位余裕空間が増加し、大寸法の素線導体を1回だけ転位する現在の巻線よりも導体占積率は低下する。また、細素線化により直接に導体を冷却することが困難となり、このため外部から冷却しようとする導体内部の温度こう配が大きくなる。

そこで日立製作所では、導体損失、導体占積率、絶縁、冷却性能及び機械強度の点でバランスのとれた細素線導体の開

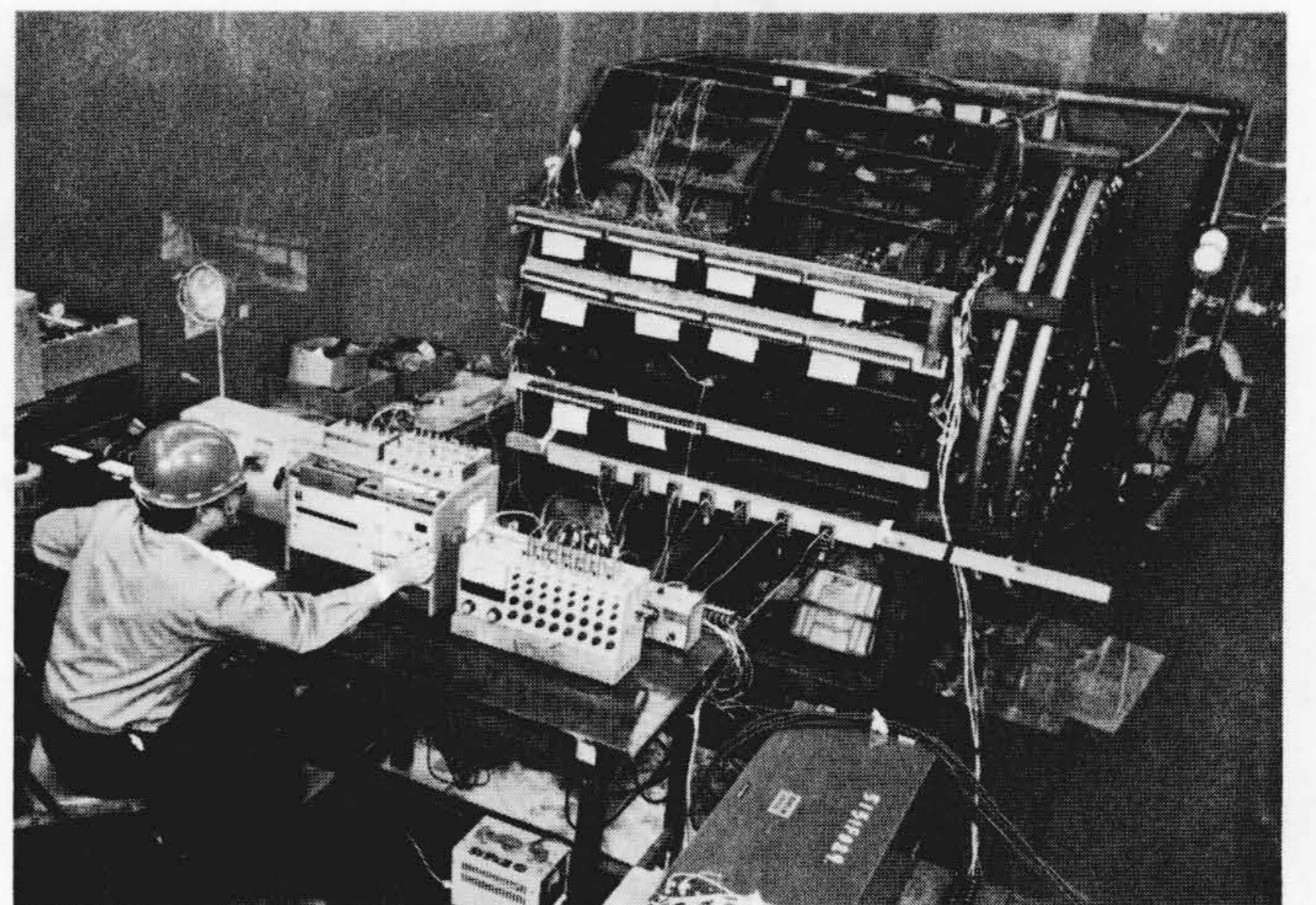


図12 4 MVA固定子の試験状況 固定子単独で三相及び单相突発大電流通電試験を行ない、巻線部の耐電磁力性能評価がなされた。

発を行なうため、各種の導体を試作し空隙巻線に適した水冷細素線二重転位導体の最適化を行なった。

### 5.2 4 MVA 固定子の試作

次に、空隙巻線固定子の長を十分発揮できる新構造、新技術を目指し、容量4 MVAのプロトタイプ固定子が試作された。この4 MVA固定子の特徴には、スキュー又はヘリカル巻線構造、巻線支持方式としての角形サポート方式、水冷細素線二重転位導体の採用などがある。図11に完成したスキュー巻線電機子の外観を示す。巻線部の全長にわたり同一直径に製作できるので、巻線部をあらかじめ一体に製作したのち、鉄心シールド内孔に軸方向から装着できるのが特長である。その反面、巻線有効部で各導体が円周方向に約180度スキューされるので、巻線電流による発生磁界及び電磁力は複雑な3次元分布となる。このため、スキュー巻線構造を対象とした3次元電磁界解析プログラムを新たに開発した。

4MVA固定子の性能評価は、従来形回転子との組合せ試験、固定子単独での大電流突発通電試験、及び超電導回転子との組合せ試験を通して、詳細かつ入念に行なわれた。その結果、期待した特性及び性能が得られ、基本的に大容量超電導発電機用固定子として有効であることが確認された。

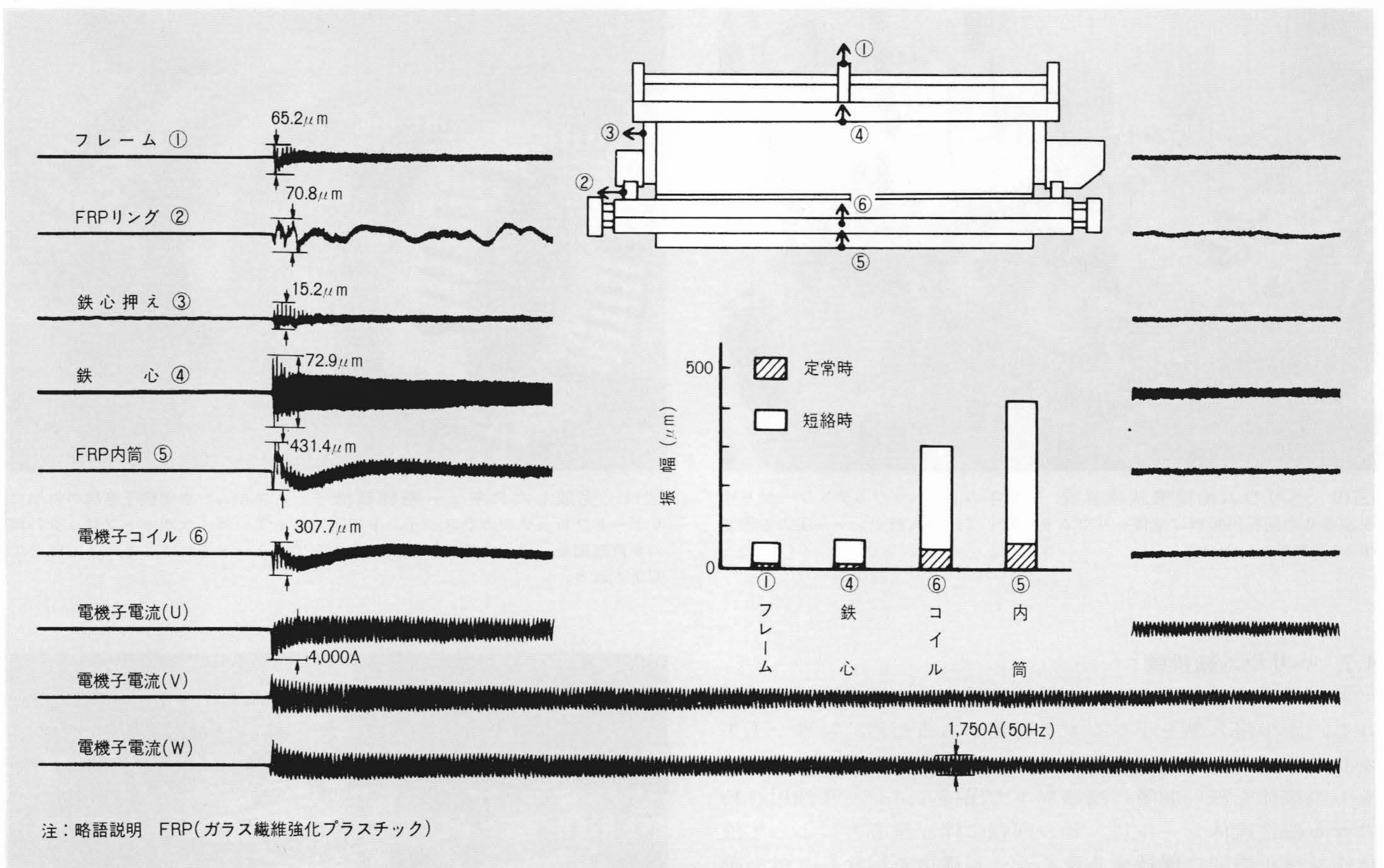


図13 外部給電三相突発短絡時の振動振幅 4 MVA固定子に対する外部電源による大電流突発通電試験結果であり、通電瞬時での内筒の径方向振動が最も大きい。

図12に固定子単独での電磁力試験状況を、図13に外部電源による突発通電時の各部振動振幅の測定結果を示す。内筒の振動が最も大きく、短絡事故時に対する内筒の振動抑制対策が重要なことを示している。

### 5.3 50MVA固定子の概要

50MVA固定子は、これまでの研究成果を十分生かして設計された。スキュー巻線構造、角形サポート方式、水冷導体など、基本的には4 MVA固定子と同一構造であるが、巻線部のコンパクト化と耐電磁力性能の改善を図るため種々の工夫がなされている。例えば、

- (1) 将来の大容量固定子では、導体数が増加し電機子巻線の多層化が必要になることを予想して、層数を選んでいる。更に、内径側よりも外径側巻線層の導体数を多くし、巻線実装密度を上げる設計とした。
- (2) 巻線内筒の半径方向振動抑制のため、新しく非磁性のロッドにより円筒をフレームに弾性支持する機構を付加した。などの点である。

以上のような新システム、新機構の採用により、50MVA固定子は4 MVA固定子に比べ、巻線占積率で約2倍、電気装荷で約3倍の高出力密度電機子として設計されている。これにより、定格出力時に巻線に加わる電磁力レベルは、出力1,000 MVA級の現在の大容量タービン発電機とほぼ同一レベルとなる予定である。

## 6 結 言

以上超電導発電機の特長、将来性に触れ、現在日立製作所で開発中の50MVA機の内容について紹介した。効率、安定度の向上、小形化及び製作限界容量の拡大が注目され、各国で

試作研究が盛んに行なわれており、実用規模のものも1990年代には登場すると考えられる<sup>1),2)</sup>。超電導発電機は従来機に比較して運転上、経済上のメリットが非常に大きいため、次代の大容量機の本命と予想されており、日立製作所はこの新形発電機の開発にも全力を挙げる考えである。ここに関係者の指導及び助言を請う次第である。

### 参考文献

- 1) J. Edmonds: Superconducting Generator Technology-An Overview, IEEE MAG-15 Jan 1979
- 2) J. Joyce et al.: Will Large Turbine-Generators of the Future Require Superconducting-Field Turbogenerators?, American Power Conference April 1977
- 3) 実松, 外: 最近における大容量タービン発電機の新技術, 日立評論, 62, 267~272 (昭55-4)
- 4) N. Makj et al.: Design and Component Development of a 50 MVA Superconducting Generator, IEEE Winter Meeting Feb. 1979
- 5) 中山: 電気機械の冷却, 日本機械学会誌, 81, 145 (昭53-2)
- 6) 尾形, 外: 自由対流による超電導発電機回転子の冷却 (第1報), 機械学会論文集(B編), 46, 331 (昭55-2)
- 7) 尾形, 外: 超電導発電機の伝熱モデルによる実験, 第17回日本伝熱シンポジウム講演論文集, 448 (昭55-5)
- 8) M. Watanabe, et al.: Experimental Study of a Practical Airgap Winding Stator Arrangement for Large Turbine Generators, IEEE Winter Meeting Feb. 1979
- 9) 実松, 外: 超電導発電機の開発, 電気学会研究会資料, RM-80-30, 1980-10