東北大金研ハイブリッド・マグネット

武藤 芳雄, 中川 康昭, 能登 宏七,
星 彰, 三浦 成人, 渡辺 和雄, 木戸 義勇

東北大金属材料研究所 超電導材料開発施設 仙台市片平2-1-1

(1984年 6 月13日受理)

Hybrid Magnets at Tohoku University

Yoshio MUTO, Yasuaki NAKAGAWA, Koshichi NOTO,
Akira HOSHI, Shigeto MIURA, Kazuo WATANABE and Giyuu KIDO

Research Institute for Iron, Steel and Other Metals, Tohoku University
2-1-1 Katahira-cho, Sendai 980 Japan

(Received June 13, 1984)

Synopsis:

The High Field Laboratory for Superconducting Materials was established in April 1981 at Tohoku University in order to provide research facilities for the development of superconducting materials suitable for superconducting magnets for the plasma confinement in fusion reactors. Main facilities of this laboratory are three hybrid magnets up to 30 Tesla *dc* magnetic fields with inner bores from 32 to 52mm in diameter. The magnets consist of superconducting outer solenoids and water-cooled inner ones with a maximum steady power dissipation of 8 MW. The design and construction of these three hybrid magnets have finished in last three years, and two of them (HM-3; 20 T, 32mm bore and HM-2; 23T, 52mm bore) have already opened to scientists and engineers in the superconductivity and other fields. The rated field of the third hybrid magnet (HM-1) is 31 (or 29) Tesla in a bore of 32 (or 52) mm in diameter. By this hybrid system we have succeeded to produce 29.3 Tesla on April 21, 1984. Detailed descriptions are presented on the superconducting magnets, power supplies and cooling systems for them, water-cooled magnets, *dc*-high power source and water-cooled system for them, the monitoring and control system for the hybrid magnets including a super-minicomputer system, a hard-wired interlock system for the safety of human beings and machines, and so on. The fourth hybrid magnet system which aims at 35 Tesla as the next phase is also discussed.

1. はじめに

定常的に強磁場を発生するマグネットには、通常超電導マグネット (SM) または水冷マグネット (WM) が用いられる。超電導マグネットの発生磁場の最高値は

科技庁金材研の 17.5 T¹⁾である。水冷マグネットが消費する膨大な電力、付随する高価な装置、強磁場という極端条件下での材料の強度などを考慮すると、水冷マグネット単独で発生できる最高磁場は、8 MWの電源を用いて約 20 T とみるのは妥当であろう。従って、

それ以上の定常強磁場発生には水冷マグネットの外側に、超電導マグネットを置き、両者の磁場の和を発生するハイブリッド・マグネット(HM)を作るのが賢明であるとの指摘²⁾が、1966年にWood (Oxford)とMontgomery (MIT)により行なわれた。

われわれは、超電導マグネット材料の開発研究に役立つことを主目的として、このハイブリッド・マグネットを、1981年以来3年にわたって建設してきた。ここに、計画の概要と現在までの成果を述べる。

2. 計画の概要^{3,4,5,6)}

われわれの計画は、技術的に確立したものよりスタートし、次第に高性能のものへと発展し、最終的には世界のトップ・レベルに到達するという方針の下に考えられた。これに従って、これまでに3基のハイブリッド・マグネット HM-3, HM-2, および HM-1 を建設してきた。一例として、HM-3 の写真と断面図を Fig. 1, Fig. 2 に示す。HM-1, HM-2, HM-3 の名称は、それぞれのマグネットが発生する最高磁場の強さの順につけられた。また HM-1 を構成する超電導マグネットを SM-1, 水冷マグネットを WM-1 と名付ける。HM-2 および HM-3 も同様である。

SM-3 および-2 には、技術的に確立したと考えられる NbTi 極細多芯線材を 4.2K で用いることにした。冷却・保冷に液体ヘリウムが比較的少量で間に合う小型ソレノイド密巻の SM-3 と、かなりの液体ヘリウムを消費するが、完全安定化した NbTi 導体を用いるダブル・パンケーキ巻きの SM-2 を製作した。SM-1 には Nb₃Sn を使用したが、その事情は次節に述べる。

また超電導マグネットの冷却には、多量の液体ヘリウムを要するので、100L/h の液化能力をもつ液化・冷凍機を設置するとともに、各々のマグネットに各種の冷却法および保冷法を試みた。

WM は、軸流冷却によるビッター型で出発し、WM-3 は single Bitter 型、WM-2 は double Bitter 型とした。導体には、強度を考慮して、少量の銀を含有した銀入り銅とアルミナ分散強化銅を用いた。また WM-1 にはビッター型より応力的に有利なポリヘリックス (polyhelix) 型を採用した。

磁場が高くなると電磁力が大きくなり、導体および絶縁体の疲労強度を考えると、WM には長い寿命を期待できないので、出来るだけ寿命を長くするように考慮した設計を行なうとともに、一方では容易にスペヤ・コイルとの交換ができる構造を考えた。また水冷マ

Fig. 1 Hybrid magnet HM-3.

Fig. 2 A cross-section of hybrid magnet HM-3.

グネットが破壊しても人身に危害を与えぬことはもちろん、超電導マグネットなどの機器にも被害が及ばないように、インターロック・システムを備えた。

水冷マグネット用大電力直流電源は、サイリスタを用いた 8 MW のものとし、電流リップルおよび直流安定度を 0.01% 程度とした。水冷マグネットの冷却には、イオン交換塔で純化した純水を使用し、その純水をターボ冷凍機で 6°~10°C に冷却し、冷凍機の冷却には、冷却塔を通過する市水を用いた。冷却塔の発する騒音には、金研の立地条件を考えて、対策をたてた。

ハイブリッド・マグネット装置の制御には、コンピュータ技術を駆使するとともに、人身・機器に対す

Table 1 Principal performance of the hybrid magnets

Magnet	Effective Bore(mm)	Central Field (T)	Power (MW)	Rated Current (A)	Type
HM-1 {	52/32	29/31	— 7.1 (7.4)	1456 — —	{Nb ₃ Sn-fm, NbTi-fm Cryostable DP Polyhelix Polyhelix
	SM-1 360	12			
	WM-1 a 32	19			
HM-2 {	52	23	— 6.7	1470 —	NbTi-fm Cryostable DP Double Bitter
	SM-2 360	8			
	WM-2 52	16			
HM-3 {	32	20	— 3.4	780 —	NbTi-fm Compact Solenoid Single Bitter
	SM-3 220	8			
	WM-3 32	12.8			

DP: Double Pancake

fm: fine-multicored

る保護・安全を確保し、施設の効率的運用、円滑な実験の進行に配慮した。

1981年度(昭和56年度)に HM-3 および HM-2 を製作した。1982年度には、水冷マグネット用の電源および冷却装置の約半分(4 MW分)の製作とヘリウム液化機(100l/h)の設置を終了した。1983年度には、HM-1 および残余の電源と冷却装置を製作した。これら3つのハイブリッド・マグネットの主要性能をTable 1 に示す。

HM の磁場発生は、1983年5月以降に行なわれた。SM および WM それぞれ単独のテストを終了した後、1983年5月30日早朝、HM-2a(Fig. 12参照)で20.1 T を発生し、次いで6月5日、HM-3 で20.5 T を発生した。その後、両マグネットでのテストを繰り返し、7月末までに、最高20.6 T までの磁場を発生した。さらに、HM-2a は、WM-2 の内側のビッターコイルの材質を銀入り銅からアルミナ分散強化銅に変えたものに交換して強度を増強し、HM-2 となり、1984年3月7日に、23.2 T の磁場の発生に成功した。

さらに、Nb₃Sn を使用した SM-1 は単独励磁試験で、12 T を発生し、また、わが国で初めて試みられたポリヘリックス型のWM-1 は、単独テストで19 T の磁場を発生した後、両者を組合せた HM-1 で、4月21日夜、29.3 T の磁場を発生した。この磁場値は、米国MIT が過去に HM で発生した30.1 および 30.4 T には僅かに及ばないが、それに次ぐものであり、現存する定常強磁場装置としては、世界最高のものである。今後われわれは、計画を進めて、30.5~31.0 T 程度の磁場発

生を行なうよう準備中である。

3. 超電導マグネット

先に述べたように、SM-3, SM-2 の導体は、NbTi 極細多芯導体である。SM-1 は外側に置かれたNbTi 極細多芯導体でバック・アップされた熱処理済み Nb₃Sn 極細多芯導体で作られた。この導体は、ブロンズ法で作製されたが、ブロンズ・マトリックスに少量のTi添加を行なったものである。

Nb₃Sn を SM-1 に使用するか否かは、HM-1 計画において最も決断を要する問題の1つであった。米・仏の30 T HM 計画では、超電導マグネット材料としてNb₃Sn 導体使用を断念して、加圧超流動冷却によるNbTi 導体を使用することに踏み切り、10~11 T の磁場発生に甘んじることにした。われわれの WM 電源は、8 MWで、米・仏の10 MWと比べて低く抑えて、電力経費を節約したので、是非とも Nb₃Sn による HM 製作を当初より目指した。このために熱処理済み Nb₃Sn 極細多芯導体による有効径 50 mm φ の13 T SM の試作研究⁷⁾を行ない、13.4 T の磁場発生に成功した。この成果を基にして、HM-1 には、NbTi 導体でバック・アップされた Nb₃Sn 導体の使用を決断した。

HM に組合わされる SM を製作する際の必要条件は、

- (イ) 冷却が容易なようになるべく軽量であること。
- (ロ) WM の掃引時やフェイルした際の交流損失によるコイル温度上昇や励磁電流の増加に対する考慮をすること。

- (イ) 導体にかかる応力（フープ・ストレス）やマグネットにかかる電磁力に充分耐え得ること。
- (ニ) 確実なクエンチ検出を行ない、安全性が高いこと。

等である。これらを考慮して、どのようにして設計・製作したかを以下に述べる。

HM に使用する SM⁹⁾には、これまでは完全安定化の設計^{9),10)}が行なわれて来た。これは中心部に組合わされているWMが0.3秒程度でフェイルした際、SMはその影響を受けて交流損失により発熱し、また電磁誘導により励磁電流が数10A増加するが、その際でもクエンチに到らないことを望むからである。

しかしながら、この様な設計は理想的ではあるが、NbTi 導体使用の 8 T級の SM の場合、約 2 トンのコイル重量となり、Nb₃Sn 導体を使用した 12T 級 SM の場合、優に 4 トン以上の重量となるため、その冷却が非常に困難になる。そこで完全安定化設計ではないが、通常の HM モードでの使用に対しては十分に安定なコンパクト設計を試みたのが SM-3 であり、ソレノイド密巻方式で作られた。SM-2 は完全安定化されたダブル・パンケーキ方式で作られた。このマグネットは導体露出率が 0.7 で Steckly の意味⁹⁾での完全安定化設計となっている。SM-1 では Williams の意味¹¹⁾での最小伝播電流 I_{mp} に対して運転電流 I_{op} が 10% のマージン ($\beta = \frac{I_{mp}}{I_{op}} = 1.1$) を持つ完全安定化設計を行なった。これによってコイル重量を 3.8 トンまで下げ得た。これらのマグネットの諸元を Table 2, 3, 4 に示す。

SM-3 のコイル重量は 270kg となり、その冷却が飛躍的に容易となった。交流損失による SM 導体の温度上昇と電磁誘導による電流増加からその安定性を見積もると、WM-3 をその定格から零電流まで 40 秒の速さでファスト・ダウンさせても SM-3 はクエンチしないことがわかった*。

SM 導体にかかる応力の大部分は、ローレンツ力に基づくフープ・ストレスである。WM との間の電磁力はそれぞれの磁場中心がずれている時にマグネット間に働き、軸方向には安定平衡の引力であり、径方向には不安定平衡力である。この力は、マグネットを支えているクライオスタットの真空容器への負担となり、

* 通常のハイブリッド・モードでは、WM は 5 ～ 10 分程度の掃引を行なうので問題はない。なお、異常時の WM と SM のファスト・ダウンはそれぞれ 40 秒と 10 分程度である。

Table 2 Specifications of SM-3

	G1	G2
Inner diameter (mm)	290	338
Outer diameter (mm)	338	435
Coil height (mm)	444	
Operating current (A)	780	
Max. field at conductor (T)	8.6	5.8
Winding type	compact solenoid	
Stored energy (MJ)	1.2	
Inductance (H)	3.9	
Weight (kg)	270	
Conductor material	NbTi	NbTi
Conductor dimensions (mm×mm)	2×4	1.6×3.5
Number of filaments	1990	1040
Diameter of filaments (μm)	40	40
Cu/non Cu	2.2	3.2

Table 3 Specifications of SM-2

Inner diameter (mm)	420
Outer diameter (mm)	922
Coil height (mm)	600
Operating current (A)	1470
Max. field at conductor (T)	8.67
Winding type	double pancake
Stored energy (MJ)	6.1
Inductance (H)	5.6
Weight (kg)	1900
Conductor material	NbTi
Conductor dimensions (mm×mm)	11.4×2.6
Number of filaments	5500
Diameter of filaments (μm)	35
Cu/non Cu	4.5

Table 4 Specifications of SM-1

	G1	G2	G3
Inner diameter (mm)	430	711	883
Outer diameter (mm)	711	883	1121
Coil height (mm)	680		
Operating current (A)	1456		
Max. field at conductor (T)	12.8	8.38	6.31
Number of turns	26	20	36
Winding type	double pancake		
Stored energy (MJ)	22.5		
Inductance (H)	21.2		
Weight (kg)	3800		
Conductor material	Nb ₃ Sn-Ti	NbTi	NbTi
Conductor dimensions (mm×mm)	7.3×4.9	7.3×3.6	7.3×2.8
Number of filaments	96000	1200	1200
Diameter of filaments(μm)	5	50	55
Cu/non Cu	3.45	5.0	7.9

Table 5 Electro-magnetic forces in SM

Magnet	Maximum stress in the conductor kgf/mm ²	Electro-magnetic forces between SM and WM (kgf/mm)	
		for axial displacement	for radial displacement
SM-1	15.8	-784	393
SM-2	8.3	-659	330
SM-3	10.7	-192	90

導体中でのストレスにはあまり大きな寄与とはならない。導体への最大応力値およびマグネット間に働く電磁力をTable 5に示す。SM コイルと真空容器は一体構造とし、それぞれのSM で種々に工夫を凝らした荷重支持体を用いて、真空容器を保持している。

これら3つの超電導マグネットは、Table 2, 3, 4に示される重量と蓄積エネルギーを持っている。これらの重量はマグネット本体のもので、冷凍重量は後に述べるようにさらに大きい。

SM-1は、中心磁場12Tで、22.5MJの蓄積エネルギーを持つ大型マグネットである。Fig. 3に、わが国の

超電導マグネットの蓄積エネルギーと磁場の関係を示す。SM-1の蓄積エネルギーは、原研のCTC マグネットの20.7MJと同程度である。10T以上のマグネットでは、SM-1は、今のところ世界最大のマグネットといえよう。

SM 励磁用の電源は、いずれもサイリスタ整流の後段にトランジスタによるシリーズ制御を加えた方式のもので、その概略結線図をFig. 4に、主要諸元をTable 6に示す。WMの緊急電源遮断(CBT)時、またはその他の大きな外乱が生じた場合には、SM がクエンチする事を考慮せねばならない。その際には、確実にクエンチを検出(QD)してFig. 4の直流遮断器(DCB)=SWをOPENにして、SMの蓄積エネルギーを保護抵抗Rに放電させる事が安全のために不可欠である。われわれは万一の誤動作をさけるために、図に示されるようにダブル・ブリッジによるクエンチ検出を行ない、SWとして従来の機械式の代りに、信頼性の高いサイリスタ方式のDCBを採用した。保護抵抗はTable 6

Fig. 3 Stored energy of large superconducting magnets in Japan.

Fig. 4 Schematic circuit diagram of power supplies for superconducting magnets.

Table 6 Specifications of power supplies for SM

Magnet	Voltage V	Current A	Ripple rms	Stability /3 h	Dump resistor Ω
SM-1	20	1,500	1×10^{-3}	1×10^{-4}	1.0
SM-2	15	1,500	1×10^{-3}	1×10^{-4}	0.4
SM-3	10	1,000	1×10^{-3}	1×10^{-4}	0.8

Fig. 5 Magnet cool-down system of SM-2 and SM-3.

Fig. 6 Cool-down characteristics of SM-2 and SM-3 by cryogenerators.

に示した値を用い、最大発生電圧を600~1500V以下におさえた。

4. 超電導マグネットの冷却システム

SM-3, SM-2, SM-1 いずれのマグネットにも、初期冷却・保冷用の冷凍システムが必要である。一番小さなSM-3の冷凍重量は550kgで、中心磁場8.0Tで1.2MJの蓄積エネルギーを持つ。SM-2は、冷凍重量3200kgで、8.0Tで6.1MJの蓄積エネルギー

をもつコイルである。さらに、SM-1は、冷凍重量4,700kgで、12.0Tで22.5MJの蓄積エネルギーを有する大型コイルである。

SM-2, SM-3の冷却システムには、それぞれPGH105ヘリウム冷凍機⁸⁾を使用した。Fig. 5にフロー図を示す。このヘリウム冷凍機は、80Kラインと20Kラインの2段階ステージが同時に使えるもので、80Kラインは熱シールドとして、20Kラインは初期冷却および保冷に用いられる。Fig. 5にみられる通り間接冷却方式であり、SM-3では、20kg/cm²Gの圧力のヘリウムガスを

用いて、20Kにおいて235cc/sec、80Kで116cc/secの流量が、SM-2ではそれぞれ263cc/sec、148cc/secの流量が得られる計算となった。これらは、クライオスタットに内蔵した熱交換器で、20Kで約48W、80Kで約115Wの能力を持つことになる。SM-2では0.6kg/cm²G、SM-3では0.9kg/cm²Gとしてクライオスタット内のヘリウムガスで熱交換させた。その初期冷却特性をFig. 6に示す。

さて、SM-2, SM-3では20Kに初期冷却した後、液体ヘリウムを注入する。SM-2では、コイル上面より上に120lを貯液するのに850lの液体ヘリウムを必要とした。蒸発速度は、無通電時で6.0l/hであり、中心磁場8.0Tの定格通電時で9.6l/hであった。SM-3では、コイル上面以上に60lを貯液するのに160lの液体ヘリウムで間に合った。HMとしては世界で最もコンパクトに作られた故である。定格通電時で8.7l/hの蒸発速度であるが、このSM-3には250lのコンテナからの液体ヘリウム自動補給システムが備えられている。

SM-1の冷却には、PGH105を用いると、コイルの初期冷却に17日かかるので、液化冷凍機による方式を採用した。35l/h、100W(4.5K)の液化冷凍機を専用として備える一方、100l/h、225W(4.5K)の液化冷凍機から約80mの三重管トランスファーラインでの冷却系も用意した。このシステムをFig. 7に示す。この三重管は外径216mmの真空断熱管で、内部に液体窒素シールドを持ち、最内部に直径27mmの液体ヘリウム輸送管が往復の2本収納されている。熱計算では、4.5Kの温度で0.56W/mであり、全長80mのライン合計で約45Wの熱負荷となる。この時、300

Fig. 7 Magnet cool-down system of SM-1.

Fig. 8 Cool-down characteristic of SM-1 by the liquefier-refrigerator.

Kから20Kまでの初期冷却には58.3時間要すると計算される。テスト実験の結果を計算値と比較したのがFig. 8である。

SM-1は液化冷凍機により直接貯液が可能である。計算では、20Kにあるコイルをコイル上面以上に150l貯液するのに、約1200lの液体ヘリウムが必要である。無通電時での蒸発速度は12.3l/hで、中心磁場12

Tの定格通電時では15l/h程度である。また、液化冷凍機による自動保液運転も可能で、液体ヘリウム液面を一定に保つ自動制御を行なう計画である。

5. 水冷マグネット

水冷マグネットには、Fig. 9に示される2つの型式のコイルが使用される。

(i) ビッター型

軸方向厚さの薄い、径方向幅の広い環状の導体に径方向の切れ込みを入れ、同型の絶縁板とを少しずらせて交互に重ねて螺旋状のコイルとしたもので、1936年に Bitter¹²⁾により考案されたものである。比較的製作が簡単で、しかも一部の破損に対しては、その部分のみを交換して再生使用できる経済的な面もあり、今まで最もよく使用されている型である。冷却水の流し方により軸流型と径流型に分けられるが、図に示されているのは軸流型である。能率をよくするためには多重ビッター型が用いられるが、高々3重が限度であろう。WM-3 および -2 にはビッター型を用いた。

Fig. 9 Schematic representation of polyhelix coil and Bitter coil.

(ロ) ポリヘリックス型

図のような単層巻線型コイル（ヘリカルコイル）を複数個それぞれ独立に支持し、電氣的に並直列に接続して1個の多層コイルとしたもの。製造工程が複雑でやや高価になるが、応力的にはビッター型より有利であり、供給電力が一定の場合の最適形状に近い形にすることが可能で、能率のよいコイルが設計できる。一般的にいて、HMの場合25T近傍を境として、それ以下ではビッター型が、それ以上ではポリヘリックス型が有利であると思われる。WM-1にはポリヘリックス・コイルを用いた。

ビッター板の円形水冷孔の分布は基本的にはビッター板の電気抵抗の水冷孔による影響を補正した Clementの経験式¹³⁾に基づいて設計¹⁴⁾した。最近 Weggelにより開発された長孔型水冷孔¹⁵⁾をWM-3用ビッター板の一部とWM-2用内側ビッター板に採用したが、その場合、長孔周辺には適当な修正を加えた。最終的にはビッター板の電流密度分布、温度分布および応力分布を有限要素法¹⁶⁾により求めた。

ポリヘリックス・コイルは、一定電力で成るべく強い磁場を発生させるという意味で、最も能率のよいコイルで、電流密度が中心からの距離 r の2乗に逆比例する。これに応力的制限および熱的制限を採り入れてコイルの最適形状および最適電流密度分布を計算した¹⁷⁾。実際のポリヘリックス・コイルの設計においては、電源冷却、材料強度、製造技術などの条件や制約のもとでパラメータ・サーベイを行ないつつ、如何に上記の最適条件に近づけるかということが問題になる。

WM-1用のポリヘリックス・コイルは2種類設計・製作された。有効径32mmのものをWM-1a、52mmのものをWM-1bと称する。最高磁場はWM-1aで得られ、単体で19T以上を、SM-1と組合せて31T以上の磁場を発生し得るよう設計された。WM-1aのヘリカル・コイル数は12個、内側より3個ずつ並列に4ブロック直列接続となっている。コイル最内径は38.0mm、最外径は299.4mmで、冷却水流量は毎時350m³、電力7.17MWで上記最大磁場が得られる。このときの各ヘリカル・コイルの温度上昇は53～60度、最大フープストレスは24.5kg/mm²で、内側より3層目のヘリカル・コイルに生ずる。この応力はビッター型に比べてかなり小さく、そのため材料は銀入り銅を用いることができ、コイル抵抗値が下げられ電力的にも有利になった。

測定結果は、設計値とよい一致を示した。単体での最高磁場は19.3Tで、HMとして29.3Tを発生した。なお、WMの設計・製作および性能に関する詳細な報告を、近く“固体物理”に掲載する予定である。

6. 水冷マグネット用電源及び冷却装置

水冷マグネット励磁用直流電源は、4.025MW(350V, 11.5kA)の出力の電源2台からなり、マグネットによって単独運転と並列運転を行なえるようにした。それぞれの電源は、60個のサイリスタで構成された三相全波整流器を用いており、電流調整は、サイリスタの位相制御装置で行なわれる。この時の基本リップル周波数が300Hzであり、これを取り除くパッシブ・フィルタと、相のアンバランスやサイリスタの点弧のばらつきに基づく300Hz以下のリップルを取り除く2段のアクティブ・フィルタを備えている。

電源からマグネット末端までの距離は往復140mに達するので、電圧ドロップを極力少なくするため、54mm×360mmの断面積のアルミバスを2枚設け、電流密度を0.6A/mm²以下に抑えた。さらに、温度上昇による伸びを緩和するために、所要所に薄いわん曲したアルミ板を母線と同じ容量をもつように重ねて溶接して取り付けた。また、それぞれのマグネットには、23kAの容量の断路器、2台の電源の取出口には、極性切換スイッチを備えて、極性交換を容易にした。

WMに8MWの電力を加えると、毎秒8MJという莫大なジュール熱が発生する。この熱を取り除くため、大規模な水冷設備を設置した。われわれの方式は、米仏などの2次冷却水に河川を利用するものと本質的に異なる理想的な冷却法である。すなわち3MWの熱を冷却することができるターボ冷凍機を2基備え、夏でも6°C～10°Cの入口温度で常にマグネットを冷却できる方式とした。冷凍機の2次冷却のためには、巨大な2基の冷却塔を設置した。また冷却塔は、高さ11mの防音壁で囲まれ、騒音を極力少なくした。なお、水冷マグネット冷却用の純水は、8MWの電源系や超電導マグネット電源の冷却にも使用する。

「水冷マグネット用電源・冷却設備」は、文献18)を参照されたい。

7. 運転・制御

HMシステムの運転を安全、円滑に行なうために、種々の計測装置を含めた制御装置が配備されている。Fig. 10は、その全体の構成図である。Table 7に示さ

Fig. 10 Block diagram of the data acquisition/control system for hybrid magnets.

Table 7 Monitoring items for the hybrid magnets

	Monitoring items	Monitoring range
1	SM coil temperature (K)	4~30 (CGR), 30~300 (Pt)
2	Current leads temperature (K)	100~300 (Pt)
3	Displacement of the cryostat ($\mu\text{st.}$)	± 2000 (Strain gauge)
4	Liquid He level (cm)	0~80
5	He gas pressure in the cryostat ($\text{kg}/\text{cm}^2\text{G}$)	-1~+2
6	Radiation shield temperature (K)	77~300 (Copper-Constantan Thermocouple)
7	SM terminal voltage (V)	± 20
8	WM terminal voltage (V)	± 350

れる測定項目は、SM および WM の正常運転に必要な項目である。これらのデータは、計測中継盤にある高耐電圧型の絶縁増幅器を通過した後監視盤およびインターロック盤用のシグナルとして与えられ、一方コンピューターにも取り込まれて CRT やプリンターに表示され、常に安全性を確認しながら実験が進行されるように配慮されている。本システムでは、WMは寿命が長いことを期待はするが、時期が至ればコイルの交換は当然おこり得るものと覚悟している。一方 SM には、致命的な故障が絶対におこらないように、その保護には最重点を置いた制御方式をとっている。

制御室には、すべての装置の監視、電源の運転、冷却系の運転等のため、監視盤、冷却制御盤、保護インターロック盤、CRT、プリンター、CPU運転パネル・ボックス、ITV等が置かれている。

電源の運転方式には2通りあり、一つはオペレーターによる普通の手動運転であるが、他の一つはCPU運転と称してマグネット実験室の実験者が、電流値をキーボードに入力し、CRT を見ながら自由に電流をコントロールする方式である。ただし、CPU 運転の場合でも、初期の運転準備は制御室のオペレーターが行ない、その運転許可ボタンが押された後に、実験者はコンピューターの操作を行なうことができる。CPU 運転ではかなり複雑なパターンによる電流上下の外に、小さい振幅の変調運転も行なえるようにした。

この CPU 運転システムは実験データの集録装置も兼ねており、各実験室には集録（測定器の出力）のための GP-IB 端子が用意されている。各端末機から GP-IB により、測定機器の制御、計測値の収集、解析、作図、作表が可能である。コンピューター (CPU) は

TOSBAC7/70B である。

8. 監視とハードワイヤード・インターロック・システム

HM 運転に際し最も重要な点は、

(イ) WM から SM への影響

(ロ) 人身および機器の安全保護の問題

である。(イ)の主要なものは交流損失による熱侵入とマグネット間に働く電磁力であることは、すでに 3 節で述べた。交流損失に対する対策は、SM の安定化設計の中に採り入れられており、マグネット間の電磁力はクライオスタットの真空容器の支持への負担になる。その大きさも見積もり、考慮に入れた。この電磁力は、当然反作用として WM にも反対方向に作用するが、これに対しては、WM ケースの支持柱にバネを入れてこの力を吸収する構造をとった。

このマグネット間の電磁力は、元来、SM と WM の磁場の中心が一致すれば零となるので、この意味で両者の磁場分布を正確に測定し、中心を一致させる事が最も重要である。われわれは HM の最初の運転に先立って、必ず両マグネットの磁場分布を測定し、それぞれの磁場の中心を中心軸上で ± 1 mm 以内で一致させている。SM および WM の磁場分布とそれらの中心が、どの程度一致しているか、HM-2 での測定例を Fig. 11 に示す。

(ロ)の問題を解決するには、両マグネットの状態を厳重に監視する必要がある。われわれはコンピューターによる監視の他に 2 面の監視盤を設け、電源系 (WM 電源, SM 電源) と SM 関係 (クライオ内圧, ヘリウム液位, 電流リード温度等) および水冷却系 (WM コイル, WM および SM 電源冷却系, 純水純度等) の監視を行なっている。しかしながらこのような監視方法

Fig. 11 Magnetic field distribution of HM-2.

では、異常発生の際“人間の判断”という過程を通してから電源遮断のボタン等を押すことになり、真の緊急時の安全は保証できない。そこで以上のコンピューターおよび 2 面の監視盤による 2 重の監視装置の他にハード・ワイヤードによる保護インターロック・システムを設けた。これは、比較的緊急を要しない異常時には SM または WM をファスト・ダウンし、非常に緊急を要する重大故障や事故の際には、SM 電源 (DCB), WM 電源 (CB) またはその両者を瞬時に遮断する動作を自動的に“人間の判断を通さずに”行なうものである。

さらに、HM 室内には、運転中は人身事故を避けるために入室を禁止し、ドア・インターロック・システムを設けている。測定はこれに隣接する HM 実験室内で行なう。

9. 磁場校正と磁場値検出

発生磁場の校正には、これまで NMR で検定されたホール素子 (コバル社製, TC-8101A), 未校正のホール素子 (ベル社製, BHA-921) およびローソン磁束計を用いた。HM-3 および HM-2a についてのホール素子による測定例を Fig. 12 に示す。なおコバル社のホー

Fig. 12 Magnetic field dependence of the Hall voltage.

ル素子は、約10T迄しか保証されていない。ローソン磁束計の場合、素子直上1.5mに素子を回転させるモーターがあり、その回転数が、非常に正確である事が要求される。しかし、磁場の中心直上1.5mのところでの漏洩磁場がかなりあるためか、約±2%の測定点のバラツキが生じた。このローソン磁束計による測定結果をFig. 13に示す。

そこでSMもWMもともにその発生磁場が励磁電流にはほとんど直線的である事実を利用して、それぞれの単独運転で決定したコイル定数と励磁電流を用いて次式：

$$H = I_s G_s + I_w G_w, \quad (1)$$

I_s : SM 励磁電流, G_s : SM コイル定数

I_w : WM 励磁電流, G_w : WMコイル定数

により発生磁場値を決定した。なおコイル定数は単独運転での発生磁場値が比較的低いため、NMR 較正ずみのホール素子で比較的容易に較正できた。Fig. 12およびFig. 13の横軸の発生磁場値は、この様にして決定したものである。

Fig. 13 Results of the magnetic field calibration for HM-3 by a Rawson magnetometer.

10. 通常の運転モードと得られた物性測定例

ここで、ハイブリッド・マグネットの通常の運転モードを紹介する。HM-2の場合を例にとって、典型的な運転モードのタイムチャートをFig. 14に示す。現在は1シフトを約4時間程度と考えている。初めにSMを7.5～7.7Tまで励磁し、その後WMをステップ・モードまたはスイープ・モードで最高磁場まで励磁しながら、種々の測定を行なう。WMの励磁電流が零になると、HM室内への立入禁止は解かれるので、測定試料の交換その他の現場での操作が可能である（この

Fig. 14 Typical operation mode of hybrid magnets.

間SMは、励磁したままで、出入りは認められるが、高磁場に励磁したままであることを忘れてはいけない。その後再びWMを励磁しながら測定を続ける。

実験者はHM実験室の端末からコマンドを発し、任意のパターンの励磁を自ら指定し、スタート指令を発し得る。実験終了後はWMの電流を零にした後、SMを減磁し、その電流が零であることを確認した後にオペレーターがWM電源系、水冷却系の休停止を行なう。

最後に、これまでにハイブリッド・マグネットの運転の際得られたデータの一例としてブロンズ法で製作したNb₃Sn極細多芯線材の H_{c2} の測定例をFig. 15に示す。この線材は文部省科研費エネルギー特別研究（核融合、第4班）で製作された共通試料である。

11. 世界のハイブリッド・マグネット

先に述べたように、HM-1を用いてわれわれは29.3Tの磁場を発生した。Fig. 16は、その時のハード・コピーを見やすいように補筆編集したものである。SM-1, WM-1のその時刻での運転状況が分かる。右上でHM-1およびWM-1の磁場値が読みとれる。

Fig. 15 Results of H_{c2} -measurements on Nb_3Sn -fm wires by HM-2.

さて、われわれのハイブリッド・マグネットを、世界の現状¹⁹⁾とTable 8に比較した。この表は、1984年4月現在で作られた。HM-1の最高磁場の目標は31Tであり、われわれはこのマグネットで、29.3Tに到達した。米国MITおよびフランス・グルノーブルでも31T以上の磁場を目指している。

ここで力説したいのは、われわれもすでに世界の最高レベルと肩を並べるまでになったことである。製作中のマグネットを除けば、MITの30.1Tと30.4Tの記録があるのみで、この両マグネットは現存していない。

われわれは、超流動 He の冷却で、超電導マグネッ

Fig. 16 Hard copy of the CRT-monitor when HM -1 produced the highest field of 29.3 T.

トの性能をあげることを研究している。最近 $NbTiHf$ の超電導線材を用いたマグネットで、1.8Kで13Tを発生することに成功した⁷⁾。われわれの1982年度に試作した Nb_3Sn 超電導マグネット⁷⁾は、4.2Kで13.4Tの磁場発生が可能となっている。超流動冷却をした Nb_3Sn のマグネットを用いれば、15Tの磁場を発生することも期待できよう。ポリヘリックス・コイルで20Tが発生できれば、わが国の定常強磁場施設の最高磁場を“35T”にあげることも、もはや夢の段階を越えて、実現への計画をたててもよい時期にきたのではなかろうか。

謝 辞

本計画の当初より推進役として御活躍下さり、絶えず激励と援助を惜しまなかった日本大学教授故安河内昂氏に心からの感謝の意を表します。学外、所外、所内の極めて多くの諸先生、事務関係の皆様、大学院学生の諸君には、計画の立案時、進行中、いろいろな立場から、大変御世話になり、ひとかたならぬ御援助を頂きました。厚く御礼申し上げます。

東芝、日本酸素、古河電気工業、三菱電機を初め約30社以上の方々が、本計画に直接、間接に御参加下さり御協力を頂きました。多くの方々から頂いた熱気あふれる御後援、御配慮に心から感謝申し上げます。

参 考 文 献

- 1) W.D. Markiewicz, E.F. Mains, R.M. Vankeuren, R.E. Wilcox, C.H. Rosener, H. Inoue, C.

Table 8 Hybrid magnets in the world (Apr. 1984)

Location		Total Field T	Superconducting magnet					Water-Cooled magnet						
			O D mm	Coil O D mm	Coil I D mm	R T Bore mm	Field T	O D mm	Coil O D mm	Coil I D mm	R T Bore mm	Power MW	Field T	
Kurchatov Inst. Moscow USSR		25		700	376		6.9		275	48	28	5.6	18.0	
			NbTi, NbZr, 25 DP's, He liq. refr. (10H)					Double Bitter (Cu, bronze), radial cool						
		30	Planning											
Clarendon Oxford UK		16			284	240	6.5		200	53	50	1.6	9.5	
			46 Spiral pancakes Philips refr. (48H) (20K)					10 Polyhelix coils Cu—0.05% Ag						
Nijmegen Netherlands		25.4	1360	889	406	356	8.5		333	38	32	5.2	17.0	
			NbTi, 22 DP's Philips refr. (7.5D)					Double Bitter (outer Cu, inner BeCu) axial cool						
FBNML MIT USA		30.1 test only					8.5		330	41	35	9.2	21.6	
			Nijmegen I					Double Bitter(outer Cu, inner Al ₂ O ₃ -Cu) radial cool						
FBNML MIT USA		30.4		710	400	356	7.5		330	41	35	8.7	22.9	
		24	NbTi, 22 DP's					7.0		333	60	54	7.3	17.0
		32		880	410		10.5						21.5	
			NbTi, 24 DP's, 1.8K P-He II, under construction											
HMFL Grenoble France & Germany		~31		1087	500		11.0				50	10.0	20.0	
			NbTi, P-He II 1.8K under construction					outer: Bitter, inner: Polyhelix						
HFLSM RIISOM Tohoku U. SENDAI JAPAN	HM-3	20	711	435	290	220	8.0		185	38	32	3.4	13.0	
			NbTi, solenoid (Ph. 2.5D)					Single Bitter (Al ₂ O ₃ -Cu)						
	HM-2	23	1300	922	420	360	8.0		320	60	52	6.7	16.0	
			NbTi, 24 DP's (Ph. 9.5D)					Double Bitter (Ag-Cu, Al ₂ O ₃ -Cu)						
	b	29	1450	1094	420	360	12.0		320	60	52	7.4	17.0	
	HM-1 a	31	outer NbTi, 42 DP's inner Nb ₃ Sn Ti-doped (R&W)						320	36	32	7.1	19.0	
Polyhelix coil (Ag-Cu)														

- Hayashi and K. Tachikawa; IEEE. Trans. Mag**13** (1977) 35.
- 2) M.F. Wood and D.B. Montgomery; Les Champs Magnétiques Intenses, Grenoble 1966 Colloques Int. (CNRS Paris, 1967) p. 91
 - 3) 中川康昭, 武藤芳雄: 応用物理, **50**(1981) 263.
 - 4) 武藤芳雄, 中川康昭: 日本物理学会誌, **37**(1982) 813.
 - 5) S. Miura, A. Hoshi, Y. Nakagawa, K. Noto, K. Watanabe and Y. Muto; High Field Magnetism, North Holland Pub. Co. (ed. by M. Date) (1983) p. 331.
 - 6) Y. Nakagawa, K. Noto, A. Hoshi, S. Miura, K. Watanabe and Y. Muto; J. de Phys. **45**, C-1 (1984) 23 (8th Int. Conf. Magnet Technology Grenoble, 1983).
 - 7) K. Noto, K. Watanabe, Y. Muto, M. Ikeda, Y. Tanaka, I. Inoue and M. Ban; J. de Phys. **45**, C-1 (1984) 83 (8th Int. Conf. Magnet Technology, Grenoble, 1983).
 - 8) M.J. Leupold, R.J. Weggel and Y. Iwasa; Proc. 6th Int. Conf. Magnet Technology (1977, Bratislava) MT-6, p. 32.
 - 9) Z.J.J. Steckly and J.L. Zar; IEEE Trans. Nuc. Sci. (1965) 367.
 - 10) B.J. Maddock, G.B. James and W.T. Norris; Cryogenics (1969) p. 261.
 - 11) J.E.C. Williams; Phys. Lett. **19** (1965) 96.
 - 12) F. Bitter; Rev. Sci. Instrum. **7** (1936) 482.
 - 13) J.R. Clement; The Generation of High Magnetic Fields and their Application in Solid State Physics, Wüzburg, (1972) p. 136.
 - 14) Y. Nakagawa, S. Miura, A. Hoshi, M. Kudo, K. Sai and Y. Ishikawa; Sci. Rep. RITU **A30** (1981) 86.
 - 15) R. Weggel; MIT Annual Report (July 1980—1981) p. 90.
 - 16) Y. Nakagawa, S. Miura, A. Hoshi, K. Nakajima, H. Takano; Jpn. J. Appl. Phys. **22**(1983) 1020.
 - 17) Y. Nakagawa; IEEE Trans. Mag. **17** (1981) 1786 (7th Int. Conf. Magnet Technology, Karlsruhe, 1981).
 - 18) T. Fujioka, Y. Sato, M. Tanabe, A. Hoshi, S. Miura and Y. Nakagawa; J. de Phys. **45**, C-1 (1984) 63 (8th Int. Conf. Magnet Technology, Grenoble, 1983).
 - 19) 中川康昭: 固体物理, **19** (1984) 58.
 - 20) K. Noto, K. Watanabe, Y. Muto, A. Sato, O. Horigami, H. Ogiwara, S. Nakamura and E. Suzuki; to be published in Proc. ICEC **10**(Aug. 1984, Helsinki).