解 説

米国における MHD 超電導マグネットの開発現状

梅 田 政 一

電子技術総合研究所極限技術部 東京都田無市向台町 5-4-1

(1978年 5 月 2 日受理)

The Present Condition of the Development with MHD
Superconducting Magnet in USA

Masaichi Umeda

Electrotechnical Laboratory Extreme Division
5-4-1 Mukodai-cho, Tanashi-shi, Tokyo

(Received May 2, 1978)

Synopsis :

The development of MHD generators is supported in USA by the Energy Research and Development Administration. Several parallel projects like U-25 (a joint work with USSR), CDIF project and AEDC project are currently being carried out.

These projects may be considered as the phase I of the MHD projects of USA. In this paper the design, manufacturing and the test of U-25 bypass superconducting magnet (phase-I) and a conceptual design for the future full scale superconducting magnet (phase-III) are described especially among the works done along this line of activities.

1. はじめに

ここ 2, 3 年の海外における MHD 発電の研究はアメリカとソヴェトで精力的に実施されているが、他のヨーロッパ諸国では計画さえも発表されていない。特に超電導マグネットの開発研究では、ソヴェトでは独自の研究はないようであり（共同研究でアメリカが超電導マグネットを分担）、アメリカの独走ともいえる。我が国においては第Ⅱ期 MHD 発電研究の Mark VIII 計画はあるが、まだ実行段階に至っていない。

DOE (エネルギー省) を中心にしたアメリカによる MHD 発電計画はベースロード用発電機の開発を目標としている。発電燃料としては石炭（電気出力規模 500 MW）で商用発電機として 1980 年代の終りに開発を完了するプログラムを策定している。図 1 は DOE の商用発電プラント開発計画を示したものであり、現在 phase I の計画段階に進んでいる。一方、米ソ 2 国間協定による共同研究（U-25 計画といわれている）が

あり、アメリカが超電導マグネットを、ソヴェトが燃焼系の研究を受持っている。

phase I 計画は、MHD 発電プラントの総合運転とシステム開発の総合評価を行う CDIF 計画 (Component Development and Integration Facility)、主に発電チャンネル開発のプログラムである AEDC 計画 (Arnold Engineering Development Center) および U-25 計画に分れている。phase I の各計画の中のマグネット建設は、U-25-B 計画では、U-25 パイパス超電導マグネット、CDIF 計画では、銅-鉄水冷マグネット（チャンネル磁界 3 T）と超電導マグネット（6 T）がある。AEDC 計画では超電導マグネット建設の計画がなく、矩形鞍型 Cryogenic マグネット（6 T）の建設計画となっている。本格的に超電導マグネットを建設すると思われるのは phase II 段階からであろう。

そこでここでは現在建設が完了した U-25 パイパス超電導マグネットの製作、励磁試験の詳細と、将来の

図 1 DOE の MHD 開発計画

ベースロード用超電導マグネットの概念設計についての2つの例から、アメリカのMHD発電用超電導マグネットの開発現状について述べる。

アメリカではMHD 発電用マグネットは入口近くにチャンネル磁界のピークを持ち、各チャンネルの電極の発電出力が一定となる、いわゆるテーパー磁界方式が採用されており、現在建設中の実験マグネットから、

将来建設予定の商用発電機で使用する超電導マグネットまでこの方式で行うようである。

2. U-25 バイパス超電導マグネット⁹⁾¹⁰⁾

この超電導マグネットは ANL (アルゴンヌ国立研究所) 超電導マグネットグループにより製作され、励磁試験が完了し、1977 年 5 月頃、ソ連に輸送され、U-25 計画の中で総合発電システム評価に使用されていると思われる。

マグネット形状は円形鞍型であり、チャンネル磁界は入口で 4 T、ピーク磁界 5 T (入口附近)、出口で 3.2T の磁界勾配を持っている。

このマグネットの設計思想は、将来の ETF (Engineering Test Facility; 実証試験), C.D.P (商用発電プラント) 開発プログラム中での設計思想とは異なっている。しかし、現状の超電導マグネットの技術水準をもとにして、最良の製作法を行うことに力をついて、我々に有効なマグネット製作技術を提供してくれたと思われる。

2.1 マグネット設計

2.1.1 マグネット形状

コイルは円形鞍型形状で、巻線内径 68cmφ、外径 141 cmφ、コイル長 375.9 cm (コイル最長) である。

図 2 U-25 バイパス超電導マグネットの構造

(a) 発電チャンネル磁界分布, (b) マグネット縦断面構造, (c) マグネット横断面構造

表 1 U-25 バイパス超電導マグネット
の諸元 (図 2)

磁界（中心軸上）		
発電チャンネル入口	4	T
“ ピーク磁界	5	“
“ 出口	3.2	“
発電チャンネル内での磁界均一度	±5%	
テーパー磁界の均一度（中心軸上）	±2.5%	
発電有効長	2.56m	
巻線型式	空心円形鞍型	
常温有効空間		
入 口	0.4m	
出 口	0.6m	
マグネット電流	892A	
インダクタンス	84.5H	
蓄積エネルギー	34.2MJ	
導体電流密度	44.6A/mm ²	
マグネット平均電流密度	28.22A/mm ²	
定常回復熱流束	0.7W/cm ²	
巻線半径	0.34m	
コイル巻線厚さ	0.364m	
コイル全長	3.759m（最長）	
層 数	23	
起 磁 力	6.3MA	
アンペア・メートル	52MA・m	
コイル構成	A	B
2 分 割	6.5T	4.5T
	（臨界電流の保証値）	
導体全長	29.8	28.04km
導体重量	～10ton	
全冷却重量	23.864ton	
マグネット全重量	36.818ton	
マグネット全長	4.4m	

チャンネル磁界分布及びマグネット構造を図 2 に示す。この磁界分布を作るためには、4 種類の長さの違うコイルを用い、ダクト内側付近は短いコイルを適当に配置することにより達成する。

各コイルは同心構成とし、コイル層数は 23 層、励磁電流は 892A が定格仕様である。マグネット蓄積エネルギーは 34.2 MJ となる。これは鞍型 MHD 用超電導マグネットとして世界一である。MHD 超電導マグネットとしても、我が国で建設された MARK-V レーストラック型 MHD 超電導マグネット (60 MJ) に次ぐ規模のマグネットである。

超電導マグネットの主仕様については表 1 に示した。

使用導体は 2×10mm の OFHC 銅母材に角溝を掘り Nb-Ti 線を半田付けし、Cu/Nb-Ti 比 15:1 の完全安定化線材である。これを 2 種製作し (短尺特性 1100A/6.5T, 1100A/4.5T), マグネット動作点は 900A/6T, 900A/3.5T で設計した。

2.1.2 電磁力支持

円型鞍型マグネットにおける電磁力は、コイル直線部では相対コイル間での吸引電磁力と径方向への膨張電磁力が線材に働き、コイル両端部では径方向成分とフープ張力となる。

径方向電磁力 (直線部) の総和は最高磁界発生断面部で $5.26 \times 10^6 \text{N/m}$ になる。これらの径方向電磁力は各層のコイルにステンレスバンドを巻き、このステンレスバンドをボアチューブに伝達し、支持する。この時ボアチューブの最大応力は 47.7kg/mm^2 となり、変形は 2.5mm と予測される。2 対コイル間の吸引電磁力は、マイカルタ板で支持し、その最大値は $\sim 2.7 \text{kg/mm}^2$ になる。コイル端部の電磁力も直線部同様ステンレスバンドで支持する。

コイル端部はテーパ磁界であるため、フープ力是不平衡となる。内側 4 層 (コイル長の短い層) はチャンネル出口方向に、全体として $6.5 \times 10^6 \text{N}$ の電磁力で引張られるため、コイル端部における力はマイカルタ充填物を介してボアチューブに伝達させている。また残りの層は入口端部の方に大きな電磁力が発生 (不平衡総和 $6.5 \times 10^6 \text{N}$) するため、前述と同様マイカルタ充填物を介してボアチューブの端部フランジに伝達し支持する。

2.1.3 マグネット安定化

この超電導マグネットの安定化については FBNL (Francis Bitter National Laboratory) に委託し、ヘリウムチャンネルの高さ、幅、補強ステンレスバンド幅、チャンネル方向、冷却面を構成する絶縁物の種類等で回復熱流束に及ぼす効果を実験した結果より決定した²⁾。水平冷却チャンネル (高さ 6mm, 幅 12.7mm), 9W 発熱状態で電流 960A (6.5T) で回復した。

この実験結果より、50% エッジ露出係数で $6 \times 12.7 \text{mm}$ の冷却チャンネルで 900A/6T で回復熱伝達係数を 0.7W/cm^2 として設計した。この高熱流束設計はターン間の熱伝達、導体に沿った熱伝達効果を考慮したものである。

2.2 マグネット製作

2.2.1 巻線装置

マグネット製作のために、(1) サーボ機構巻線シス

テム、(2)超音波溶接機、(3)絶縁テープ供給装置、(4)張力装置を開発した。

超電導導体は2 km 長で製造したため、コイル巻線中で接続が必要になる。導体接続は20 cm 重ね合わせて超音波溶接で行った。接続部の引張強度は207MN/m²で、接続抵抗は4.2K、零磁界で $2 \times 10^{-10} \Omega$ であった³⁾。また溶接部の空孔は超音波を使って調べたが問題が無かった。

全体の巻線は導体付着物(半田、銅バリ)を取り、(4)の装置で張力をかけ、フロン洗浄を行い、熱風乾燥し、(3)の装置で絶縁テープを付け最後に(1)の装置を通す。

(1)の巻線装置はターンテーブル方式でベニヤ板製の半円筒を使用し、ターンテーブルは垂直軸の回転と水平軸回転機構を持ち、この2つの運動は電子サーボ機構で制御している。

導体は矩形であるため、23 ターン毎に9°の楔を入れ、鞍型コイルを補正した。

2.2.2 コイル構造

図3はコイルの直線部と端部の層間の導体構成を示したものである。導体に直接接触する面は摩擦低減のためテフロンテープを入れ、マイラーテープで絶縁したステンレスバンドをG-10でサンドイッチにした構造とした。コイル端部はステンレスバンドと導体が並行になる部分があるので、G-10ブランケット表面に

は溝(50%)を設け冷却チャンネルを確保した。

電磁力によるコイル端部の偏心力に起因する、導体運動を避けるためマイカルタ板とフランジ間のすきまにはA&Bエポキシパテを詰めコイル移動に注意した。

バンド端は、フランジに巻トルクが加わらないように各層毎に巻方向を変えると共に、巻始めフランジも交互とした。

最外周バンド(23層目)は、マグネットの全径方向電磁力を支持できるようSUS-304テープ(幅28.4mm, 0.75mm厚)を450kgの張力で28.6mm厚まで33層巻きつけた。また最外層のコイルを3.1mm厚のブランケットでおおい、50%エッジ冷却を可能な溝を掘った。

2.3 マグネット計測システム

2.3.1 各種監視センサー

各コイルの両端に電圧端子を取り付け、各層に冷却中の温度を知るため温度センサーを取り付けた。液体ヘリウム液面の監視のためフレキシブル液面計をクライオスタット底、コイル巻線中央、上部に取り付け、上部液面計2本(10cm)は液体ヘリウムの移送、レベル警告、非常時の液放出の制御に使用した。

ボアチューブ最大磁界発生断面及び両フランジ、ヘリウム槽の外筒には歪みゲージを貼り付け、液体ヘリウム溜外壁には加速度計と温度センサーを取り付けた。またクライオスタットの行き、帰りの低温ガス温度を監視するため最外周ステンレスバンド近くにある低温ガス分配器に温度センサーを設置した。

2.3.2 電源及び保護抵抗

励磁電源は20V-1,000A(Sorensen社製)で電圧、電流変動率は各々 $\pm 0.1\%$ 、 ± 2 Aである。

保護抵抗(ステンレス水冷方式、 0.12Ω)は中点を接地し、定格励磁からのエネルギー放出時のマグネット両端の電圧は118V、対地電圧は59Vである。

マグネットの絶縁耐力は1,000Vに設計し、エネルギー放出時定数は12分である。

エネルギー放出条件は、(1)熱絶縁真空の劣化(1×10^{-3} torr 以下)、(2)マグネットの常電導遷移、(3)電流パワリドの異常、(4)液体ヘリウム液面低下等であり、電流掃引停止条件は、(1)マグネット運転電流の0.1%以上の増加、(2)励磁電圧の異常上昇、(3)電源のダイオード等の異常温度上昇である。

2.4 マグネット冷却システム

2.4.1 クライオスタット構造

図3 U-25 バイパス超電導マグネットのコイル層間構造

図 4 U-25 バイパス超電導マグネットのクライオスタット

クライオスタットは図4で明らかなように両端から F.R.P 3本で低温重量部を支持している。

クライオスタットのボアチューブおよび両フランジには SUS-316 を使用し、ボアチューブは一体ものから機械加工し、6.4 cm 厚のフランジを溶接した。残りの構造物は SUS-304 を使用している。ヘリウム層外筒は 5 枚の板を TiG 溶接した。この時残留応力減少のため冷却 (0.2 cm 収縮) しながら実施した。

ヘリウム槽にはアルミマイラーおよびガラス紙絶縁物を巻き (積層密度 20 層/cm)、液体窒素シールド板は外筒 2 枚、端部 2 枚、マグネット内筒用 1 枚から製作した。このシールド板には SUS-304 (0.2 cm 厚) を使用し、銅管 (0.960D) を

半田付けしたものである。
ステンレスを使用したのは、エネルギー放出時には、渦電流により、シールド板破壊を防ぐためであり、銅配管ピッチは、シールド板内の温度差が 3 K 以下になるよう決めた。シールド板は、F.R.P で真空槽から支持し、ヘリウム槽との接触を防ぐため G-11 パンパを格子状に入れた。

冷媒供給配管は分配マニホルドにつながり、冷凍機

帰りのライン、液体ヘリウム注入ライン、排出ラインはマグネットの底から出ている。液体ヘリウム上部供給は液面計の上まで来ている。これらのラインには全て焼結ステンレスフィルターを設置した。マグネット常伝導転移等の緊急時のための液体ヘリウムまたはガス放出用 10 cm 径の放出ラインも設けた。

2.4.3 冷凍液化システム及び冷却

このマグネットの運転は、図5で示すような冷却システムで行った。図5から明らかなように冷却システムは、冷凍液化機 (CTi Model 1,400 一部改造)、液化機 (CTi Model 1,400)、500 l ヘリウムコンテナ 3 台、コンプレッサーユニット 4 台、ガスバック、ヘリ

図 5 U-25 バイパス超電導マグネットの冷却システム

ウム回収コンプレッサー及び高圧ガスタンクよりなる。500 l コンテナは互いに移送管で結び、ヘリウム移送はガス圧作動弁で制御室から行う。

このマグネット冷却時に、各所の熱容量の差（ヘリウム外筒とマグネットおよびボアチューブ）が大きな熱応力を発生させ、材料の許容応力を容易に越えてしまうため、300 K から 100 K までは冷却中の温度差を監視しながら冷凍機からの供給ガス温度を制御し、25 K 以下の温度差以内に保つように注意した。

冷却は3段階に分け実施した。300→100 K までは液体窒素で冷却されたヘリウムガスで行い、100→15 K までは冷凍機で冷却した。15→4.2 K の冷却は液体ヘリウムをクライオスタット下部から注入し、液面保持は上部供給ラインから行った。

マグネット運転中のクライオスタットへの液体ヘリウム注入、熱シールドおよび窒素タンクへの液体窒素補給は自動制御し、主液体ヘリウムコンテナへの再注入は遠隔操作による手動で行った。

パワリードへの熱侵入量は設計値は 3 W であったが、実測では 4.8 W であり、液体ヘリウムへの全熱侵入量は 5.5 W であった。

図 6 で示すように 300→15 K への冷却に 3 週間かかった。この冷却ではほとんどトラブルが発生しなかったが、最初の 2～3 日間は冷凍機の熱交換器内に氷ができたため、数回冷凍機を停止させた。

液体窒素消費量は 1 l/hr. で輻射熱シールド板の温度～79 K であった。なおシールド板内の最大温度差は 3 K であった。支持リンクのヒートシンク温度は 120 K であった。

図 6 U-25 バイパス超電導マグネット冷却実験結果

2.5 荷重設計

MHD 発電チャンネル動作中に未知の力と振動荷重が室温ボアに加わる。これらの荷重条件を決定することも本システムの目的である。そこで過渡的荷重に対する設計を次のように決めた。

(i) 垂直下方; 3 g

(ii) 水平面内の 2 軸方向; 各方向共 ± 1 g

これらの設計値は重量 29.548 ton で行った。(実際の重量 25.832 ton)

マグネット輸送時において、マグネットに加わる加速度を真空槽の 3 軸加速度計で測定した結果では、垂直方向: 1 g, 前方向: 1 g, 後方向: 1 g, 横方向: 2.1 g であった。

3. ベースロード級 MHD 発電用超電導マグネットの概念設計

3.1 概念設計の流れ

DOE は毎年ベースロード規模での MHD 発電用超電導マグネットの概念設計を研究委託している。この委託研究でベースロード規模での設計の再検討が行なわれ、そのつど具体的な新しい設計基準、指針が指摘されて来た。

商用ベースロード規模での超電導マグネットのマグネット形状としては図 7 で示すように、(a) レーストラック型、(b) ソレノイド型、(c) 鞍型が考えられる。デスク型発電方式ではソレノイド型、直線チャンネル発電方式ではレーストラック型、鞍型が考えられる。ベースロード規模での発電方式は直線チャンネルが使用される。そこで鞍型、レーストラック型について概念設計を行い、マグネット建設コストを比較検討した。その結果から鞍型形状が良いと報告している⁴⁾。また、2 つの形状について電磁力支持、線材磁界の低下を兼ねマグネット構造材（主に電磁力支持材）に 9 %Ni 鋼を使用する提案もなされた⁵⁾。しかし、液体ヘリウム中での構造材としての強度の問題、被冷却重量の増加は、ピーク磁界比の低減効果の小さいことや 9 %Ni 鋼の電磁力支持構造の形状によっては外部への磁界の端部効果が大きくなり、磁気遮蔽を難しくする可能性もあり、経済効果があまり大きくないことがわかった⁴⁾。

ベースロード用超電導マグネットの規模は重量～3,000 ton, クライオスタット外径 12 mφ, 全長 25 m 前後となる。この規模では、アメリカにおいても道路輸送に問題があり、一体輸送が困難である。そこでコ

図 7 MHD 発電用超電導マグネットの基本的な構成

イルの分割製作，クライオスタットの製作等の研究⁶⁾，また鞍型でのマグネット形状選択，コイル分割の大きさ等が議論された⁷⁾。またこのような大型超電導マグネットでは作業空間への洩漏磁界による計測器および人間への影響が大きくその対策等についても議論された⁴⁾⁵⁾。

3.2 ベースロード用超電導マグネットの形状

Montgomeryらは直線チャンネルを使ったベースロード用超電導マグネットを図7に示すようなマグネット形状で概念設計を行った，その結果によると，チャンネル磁界に対する線材経験磁界比（ピーク磁界比と呼ぶ）は鞍型形状では 1.25 に対し，レーストラック型，ソレノイド型ではそれぞれ 1.5, 1.7 倍となり，電磁力支持等のため重量増加は，鞍型 1 に対し，それぞれ 1.2, 1.7 倍になると報告している。特にピーク磁界比が小さくなることは超電導導体量，安定化銅量をレーストラック型の半分以下，マグネット蓄積エネルギーを 6 割以下にでき，その他の電磁力支持材，クライオスタット重量の軽減効果もあり，ベースロード用大型超電導マグネットには鞍型形状が最適であると結論している。

しかし鞍型形状でも図8に示すように，端部のわたりの曲率，幾何学形状の処理により，ピーク磁界比がかなり変化することが報告されている。Stekly らの報告によると，(a)矩形鞍型，(b)円形アーチ鞍型，(c)円形円弧鞍型で各々 1.57, 1.65, 1.75 ($J=2.5 \times 10^3 \text{ A/cm}^2$) と端部処理で非常に変化すると報告もあり，マグネット形状の選択に当っては，後述する製造，組立，輸送等の問題を考慮して決定する必要がある。

る。

3.3 大型超電導マグネットにおける安定化

超電導マグネットの熱的擾乱要因として，(i)超電導体の本質的不安定性である flux jump, (ii)最近注目されて来た電磁力等による導体運動及び歪み，応力緩和による発熱が考えられる。(i)への対策は超電導線材の fine-multi 化，twist 化による安定性保持と，低抵抗率母材 (Cu, Al) との複合化による熱的完全安定化である。(ii)への対策は導体保持構造の再検討でこれらによる熱擾乱を極力押える方向に努力している。しかし現状ではこの発熱量の評価が難しく，熱的完全安定論で設計が行なわれている。現在大型超電導マグネットにおいては，液体ヘリウム浸漬冷却方式で臨界熱流束 $\sim 0.4 \text{ W/cm}^2$ ，導体体積と液体ヘリウム張込み量比は 0.3 $\sim$ 0.6 程度で設計されたものが成功している。

アメリカでの MHD 発電用超電導マグネットの概念設計でも，この保守的な安定化論を使って全ての設計が行なわれている。しかし上記した(ii)の熱擾乱による不安定性については今後早急に理論解析及び実験をおこなう必要があると強調している。

強制冷却方式による超電導マグネットの冷却は，現在 OMEGA 計画があるが大型マグネットへの採用には実証例をまだ増す必要がある。アメリカでは AEDC プロジェクトで強制冷却（水冷， LN_2 ）による 6T，MHD 発電用マグネットを計画しているが，この Cryogenic マグネットは大型マグネットの安定性評価の研究に有効であろう。

3.4 マグネット構成とコスト

600MW 電気出力のベースロード用鞍型テーパ磁

図 8 鞍型超電導マグネットの端部の構造によるピーク磁界比の変化

ピーク磁界比; マグネット線材最高経験磁界と発電チャンネル最高磁界との比

界超電導マグネットでチャンネル磁界に対するプラント建設コストを試算すると、6 T 付近に浅いミニマムができるとの報告がある¹⁰⁾。

図 9 はこの最適磁界での超電導マグネットの構造材、超電導材、安定化材、低温容器及び全体のコストが電流密度でどう変化するかを計算した一例を示したものである。図からも明らかのようにコスト中一番比重の大きいのは構造材(45%)、超電導材(30%)であり、構造材のコストが非常に大きい。また高電流密度化は全体コストへの経済効果が一般の予測ほど大きくない。たとえば $1.5 \sim 3.5 \times 10^3 \text{ A/cm}^2$ の増加で全体コストの減少は 28% 程度である。

3.5 大型超電導マグネットでの磁気遮蔽

大型 MHD 発電用超電導マグネットにおいて経済性を高めるために、鉄心入りマグネットがいくつかの局面で考えられたが、前述したようにあまり重要な役割を持たないことが明らかとなった。

しかし図 10 で示すように、MHD 発電用超電導マグネットでは、常温空間に漏洩する磁界は大きく、たとえばダクトから 10m 離れた距離での洩れ磁界は 0.15 T、その磁界勾配は 0.025 T/m となる。これらの磁界は測定器、モーター、電磁弁、リレー等の周辺機器

図 9 ベースロード用 MHD 発電のための超電導マグネットのマグネット電流密度の変化による相対コスト

の誤動作の原因となる。また 60m の距離でも 10^{-3} T と大きく、小さなリレーやオツシロ等の計測器に影響があると思われる。

これら洩れ磁界による影響が特に大きいと思われるのは、これらの環境で作業しなければならない人間の生理への影響であり、磁界の生理への影響は現在研究

図10 漏洩磁界の計算例 ($VB^2=4,000\text{m}^3\text{T}^2$)

中である。これら为了避免するためには、周辺機器の非磁性化またはクライオスタットの外側の常温空間で磁気遮蔽が必要である。

3.6 運搬と建設

ベースロード用超電導マグネットではマグネット本体だけでも長さ18m、幅8m、重量1000tonクラスとなり、製作、組立および輸送が重要な問題である。一体化した状態でマグネット輸送することは経済的ではない。

そこでこれらの製作、輸送、組立て工程を操り入れたマグネット設計が要求される。この点から鞍型マグネットの概念設計を行った報告が最近提案された。

その一つは Stekly らが行った矩形鞍型超電導マグネットであり、もう一つは Hatch らが行った円形鞍型超電導マグネットの概念設計である。

Stekly らは輸送を考慮した場合、なるべく超電導マグネットの形状を簡略化し、またコイルの製作及び組立を単純化した方が良くと考え、3つの鞍型形状を考えた(図8参照)。

それは矩形鞍型、円形アーチ鞍型、円形円弧鞍型である。これら3つで上記単純化作業を行い概念設計の比較を行った結果、矩形鞍型形状はコイルのピーク磁界比が高くなる欠点を持つが(これは超電導体断面積の

図11 ベースロード用 MHD 発電超電導マグネット概念設計例

表 2 ベースロード用超電導マグネットの諸元 (図11)

超電導マグネット寸法および磁界		コイル構成および特性			
発電有効長	16m	3 分割	A	B	C
磁界 (中心軸上)		最高経験磁界	8.1	7.2	5.5 T
発電チャンネル入口	6.0T	平均電流密度	11.8	12.7	14.0A/mm ²
“ 出口	3.4T	導体電流密度	30.3	32.7	36.1A/mm ²
発電チャンネル内での磁界均一度		導 体 幅	34.8	32.3	29.2mm
発電チャンネル入口	±2%	導体厚さ	14.3	14.3	14.3mm
“ 出口	±3%	銅/超電導体比	15.0	22.5	32.0
クライオスタット全長	25m	マグネット諸元			
常温空間口径		設計電流			14.5kA
クライオスタット入口	2.25m	起磁力 (入口端)			37MA・turns
発電チャンネル入口	2.64m	“ (出口端)			32MA・turns
“ 出口	4.8m	アンペア・メートル			1830MA・m
クライオスタット出口	5.5m	使用導体長			126km
クライオスタット入口から発電チャンネル入口		インダクタンス			57 H
までの距離	4.15m	蓄積エネルギー			6100MJ
クライオスタットの外径		平均導体占積率			0.37
入 口 端	10.1m	冷却流路幅			0.34cm
出 口 端	12.5m	フェイスターリング			56%
マグネット構成重量		熱 流 束			0.4W/cm ²
超電導導体	460ton	液体ヘリウム占積率			0.4
電磁力支持材 (矩形ガーターの場合)	1,960ton	コイル内での全液体ヘリウム貯液量			23,000liters
巻枠および絶縁材等	230ton	コイル上での “			1,000 “
クライオスタットおよび熱シールド材	230ton	設計応力 (最大値)			
全 重 量	3,470ton	導 体			83MN/m ²
		電磁力支持材			179MN/m ²
		電気絶縁材 (圧縮力)			83MN/m ²

増加により解決する),コイルが単純形状となるため,分割製作が簡単となる。また上に記した輸送単位も小さくでき,プラントサイトでの組立が単純構造の積層ですみ全体のコストを考えると非常に有利であると結論した。

一方,最近 Hatch らは矩形,円形鞍型超電導マグネット で電磁力支持,製造,輸送,製造工場及び設置場所での組立等を考慮して概念設計を再吟味し,その有利性を比較検討した。

その結果によると,矩形鞍型マグネットは導体重量が大きくなるが,マグネット形状側から見ると冷却流路構成及び巻線モジュールが平板の積層で容易な構造となり,円形鞍型形状に比べ優位性が多いと考えられる。

しかしマグネット組立時の整合性及び固定法における機械的精度とモジュール形状,構成要素の輸送時の

重量については,製造,設置各サイトでの労力及び組立スペース等を考慮した最適化を行った結果,次の結論を得ている。

矩形鞍型では各要素の成形,機械的接合 (溶接も含む) が少なく製造段階では優位性があるが,プラントサイトでは組立時の機械的接合面で困難性が伴う。特に導体及び冷却流路の接合は複雑な構成となる。

それに比較し,円形鞍型では製造段階での組立特性の困難性が伴うが,導体コストが少ないこと,プラントサイトでの組立が簡単になることから総合比較すると円形鞍型に優位性が認められる。

図11は Hatch らが行ったベースロード用超電導マグネットの概念図と表 2 にその諸元を示す。

3.7. 結論及び今後の開発要素

これらのベースロード用超電導マグネットは現在すぐ設計,建設ができ,成功裡に運転可能となるという

確証はない。現状の超電導マグネット製作及び実証規模からのスケールアップには大きな技術的障壁と困難性を伴う。その意味でも製作の立場から厳しい設計のリファインと実証試験の評価が必要である。

超電導マグネットの各構成要素の大部分は現在でも製作可能な状態にある、しかし、導体の機械的運動効果を操り入れた実験的確認がない現在では、各要素の組合せ技術からなる超電導マグネットにおいて、そのスケールアップには十分な計画性が要求される。そこで今後の要素開発及び組合せ技術のため、以下のことを行う必要があると提案している⁴⁷⁾。

- (i) 導体運動等による熱擾乱とマグネット安定性に関する研究と実証試験
- (ii) ベースロード用超電導マグネットに使用する大容量導体の試験とその評価
- (iii) 導体接合についての開発と試験
- (iv) 導体巻棒の材料選定とクエンチ時のダンピング効果の解析と実験
- (v) 各要素の材質、製造実績を得るための ETF レベルでの全要素組立によるマグネット実証試験と評価
- (vi) 設計予測技術として、冷却、励磁中での巻線内部および各セグメント間での応力分布と相対運動を計算するプログラム
- (vii) コスト解析プログラムの開発
- (viii) 構造材の形状による電磁力支持プログラムのリファイン

4. ま と め

アメリカにおいては、DOE を中心に 1989 年に MHD 発電機のベースロード商用プラントの建設を目標に研究開発計画が進んでいる。このプラントの建設計画の

中では超電導マグネットの本格的な建設は実証規模段階で予定されており、現在 U-25 バイパスマグネット以外は概念設計の段階にある。CDIF 計画において、マグネットの超電導化も計画されているが、この超電導マグネットが建設されず、実証規模マグネット (図 1 phase II) へ進む可能性もあり、今後の研究開発に注目したい。

この報告は MHD 発電システム小委員会超電導マグネット幹事会で調査研究した結果をまとめたものであり、安河内昂主査、秋山好胤幹事、ならびに幹事会委員諸氏に深く感謝致します。

参 考 文 献

- 1) W.D.Jackson : Inter. Society Conversion Eng. Conf. (1976)
- 2) Y.Iwasa et al. : IEEE Trans. on Magnetics MAG-13 (1977)
- 3) J.W.Hafstrom et al. : IEEE Trans. on Magnetics MAG-13 (1977)
- 4) D.B.Montgomery et al. : 6th Inter. Conf. on MHD Electrical Power Generation V. IV (1975) 115
- 5) A.M.Hatch et al. : Proc. 13th Sym. on Eng'g, Aspects of Magnethydrodynamics V, (1973) 4
- 6) Z.J.J.Steckly et al. : 1974 Appl. Superconductivity Conf.
- 7) A.M.Hatch et al. : Cryo. Eng'g. Conf. (1977) BD-5
- 8) S.T.Wang et al. : Cryo. Eng'g. Conf. (1977) BD-3
- 9) R.C.Niemann et al. : Cryo. Eng'g. Conf. (1977) BD-2
- 10) D.A.Oliver et al. : MIT GTL Report No. 107 (1972)