小型SRリング用超電導電磁石のコイル保護システムと 永久電流モード下長期運転への適用

正員	松田哲也(三菱電機)	正員	守田正夫(三菱電機)
正員	山本俊二(三菱電機)	正員	竹内敏恵(三菱電機)
非会員	川口武男(三菱電機)	正員	中村史朗(三菱電機)
正員	山田忠利(三菱電機)	正員	岩本雅民(香川大学)

The Coil Protection and the Long Term Operation of the Compact SR Superconducting Magnet

Tetsuya Matsuda, Member, Masao Morita, Member,
Syunji Yamamoto, Member, Toshie Takeuchi, Member,
Takeo Kawaguchi, Non Member, Shiro Nakamura, Member,
Tadatoshi Yamada, Member (Mitsubishi Electric Corporation)
Masatami Iwamoto, Member (Kagawa University)

We developed a compact SR magnet which is operated at 3.5T(350A) at persistent current mode. This SR magnet is used for the light source of X ray lithography. If the SR magnet is located at the semiconductor factory, the magnet needs to be highly reliable for a long term persistent operation. The coil should be protected from a large terminal voltage due to its high inductance in case of quenching even if it is a rare accident. We evaluate the coil voltage and developed an active coil protection system for long term persistent operation. This system is composed of the quench detector, external resistive heaters and current power supplies for those heaters. Each components are connected to UPS(uninterruptive power supply) that can supply power for 15 hours with batteries. We can lower the maximum quench voltage to the sufficient safety level that is about 1,000V by using this active coil protection system. We have obtained total 40,000hours of operational experiences of this superconducting magnet at persistent current mode without any trouble. At present, this magnet is under successive operation for nearly one year. Through these operations, we have confirmed the high reliability of this superconducting magnet.

キーワード：SR光、SRリング、超電導電磁石、永久電流運転、コイル保護、強制クエンチ

1. まえがき

光速に近い速度の電子ビームは偏向磁界中でその軌道が曲げられる際、軌道接線方向に強い光(シンクロトロン放射光あるいはSR光と呼ぶ)を放射する。SR光は、指向性が良い上に電子ビームエネルギーと偏向磁界を適度に選べば10 Å前後の軟X線領域で高い強度が得られることから、次世代半導体デバイスのリソグラフィ用光源として注目されている。このSR光を連続的に発生させるための装置、すなわち電子ビームを磁界により偏向させながら長時間蓄積するための装置をSRリングと呼ぶ。

筆者らはこれまでに、超電導電磁石を適用した小型のSRリングの試作開発を行ってきた。現在、試作を完了し研究所内に設置したSRリングを使って半導体デバイスのリソグラフィ技術開発が並行して進められている⁽¹⁾。

このSRリングは180度偏向の超電導電磁石2台で構成し小型化を図っている。この小型SRリング用超電導電磁石は以下の様な従来にない特長を持つ。

- (1)主偏向コイルに加え4極、6極の2種類の補正コイルの装備による磁界均一度の向上。
- (2)電磁石の断熱構造の工夫による液体ヘリウム消費量

の低減。

- (3)電磁石最外周の磁性シールドによる漏れ磁界の低減。
- (4)永久電流運転による磁界安定度の向上。
- (5)強制クエンチ方式コイル保護システムの適用による長期運転時の信頼性の向上。

これらの特長の内、(1)から(4)に関連する検討結果についてはこれまでもいくつか報告してきた^{(2)~(6)}。

(5)は、例えば半導体製造装置としての実用機を考えた場合、導入時の評価項目として重要な「超電導電磁石の信頼性」に関する事項である。従って、その保護方式の選定や具体的な検出電圧の設定に関しては、耐震性能を含め長期連続運転を前提とした十分な考察が必要である。特に、この超電導電磁石の主コイルのインダクタンスは68.4H、また蓄積エネルギーは4.2MJと比較的大きく、万クエンチが発生すればコイル間の発生電圧も大きくコイルの絶縁破壊につながりかねない。従って、発生電圧を低減しコイルを保護するコイル保護システムはこの種の超電導電磁石には必須となる。しかし、これまで永久電流運転方式の超電導電磁石でこのような大きなインダクタンスのものはあまり例がなく、長期運転下での実証も充分になされていなかった。

図1 超電導電磁石の構造
Fig.1The schematic illustration of
a superconducting magnet

た。
本論文では、永久電流運転方式のSRリング用超電導電磁石におけるコイル保護システムについて、その方式、保護システムの設計、電磁石適用後の試験評価、及び検出電圧の設定方法に関する検討結果を述べる。

これらの検討結果は、実際にSRリングとして完成後にやってきた永久電流モード下の長期運転試験において、その妥当性を確認することができた。本論文ではこの長期運転試験結果についても述べる。

2. 小型SRリング用超電導電磁石

超電導電磁石の構造の外観図を図1に示す。超電導電磁石は、主コイル(偏向コイル)、誤差磁界補正用の4、6極補正コイル、磁気シールドで構成した。磁気シールドは漏れ磁界低減用である。図に示す様に、これらのコイルはバナナ型と呼ばれる形状をしており、ビーム軌道面に対し上下方向に対称な1対の構成である。各コイルはそれぞれ上側と下側の2つのコイル容器に収納し、コイル容器はX,Y,Z方向の3種類のGFRP製のコイルサポートを介して磁気シールドに取り付けた。コイルはパンケーキ巻きであり、層間には20mm間隔で厚さ0.3mmのGFRP製のスペーサーを挿入しヘリウム流路を確保している。超電導線材は1.3mm×2.6mmのNbTi線である。超電導電磁石の諸元を表1にまとめる。

3 コイル端子間電圧の計算とコイル保護方式の検討

<3.1>超電導コイルの励磁回路 SRリングには、超電導電磁石を2台設置している。励磁時は、これらの電磁石を直列

表1 超電導電磁石の諸元
Parameters of a superconducting magnet

偏向磁界		3.5T
偏向半径		0.593m
電子ビームエネルギー		600MeV
蓄積エネルギー		4.2MJ/magnet
液体ヘリウム蒸発量		1.5L/hr/magnet
主コイル	電流	350A
	磁界	3.5T
	インダクタンス	68.4H
4極補正コイル	電流	236A
	磁界	-1.9T/m
	インダクタンス	0.24H
6極補正コイル	電流	110A
	磁界	+2.5T/m ²
	インダクタンス	0.28H

に励磁するが、励磁後はそれぞれの超電導電磁石を永久電流運転モードとするため、2台の電磁石は電氣的に独立になる。パワーリードを引き抜いた後の1台の電磁石の回路を図2(a)に示す。上下の主コイルは直列に接続した。これは、万一のクエンチ時に上下コイルの電流がアンバランスになり、上下方向不平衡電磁力が発生することを防ぐためである。3種類のコイルは独立に励磁するため、独立の3個の閉回路を構成する。また、各回路には永久電流スイッチ保護用のダイオードを取り付けた。

図2(a)の上下主コイルの両端ac間は永久電流スイッチにより短絡状態になる。従って、例えば下主コイルの端部が万が一クエンチした場合、上主コイルの電流端子ab間及びクエンチした下主コイル端子bc間には電圧が発生する。本電磁石はインダクタンスが68.4Hと比較的大きく、クエンチ時の発生電圧も大きい。従って、予め発生電圧を正しく評価し、もし過大な電圧が発生する様なら、その電圧を低減するための保護装置を検討する必要がある。図2(b)はこのときのコイル電位分布を模式的に示したもので、端子ab間及びbc間に大きな電圧が発生する。図2(c)には、上下コイルの端部が同時にクエンチした場合の図も示した。この場合には、コイル端子ab間及びbc間には電圧は発生しない。

ところで、本電磁石ではコイルのチャージアップの可能性は少なく、コイル端子間電圧とコイルと対地間の電圧とは一致すると考えられる。即ち、コイル端子間電圧が低減すれば、対地間電圧も低減する。また、クエンチにより常電導部が伝搬すれば、コイルが経験する電圧として端子間電圧が最

図2 主コイル、補正コイルの回路図とクエンチ時の主コイル内部電圧分布

Fig.2 The circuit of the main coil and correction coils and

the voltage distribution along windings of the main coil when the main coil quenches

も大きく、層間電圧、ターン間電圧は小さい。

<3.2>コイル端子間電圧の計算 次に、クエンチ時の主コイル端子間電圧を計算により評価した。端子間電圧は、2種類の補正コイルとの相互誘導の効果も考慮にいれ、(1)式から評価した。なお計算方法の詳細は文献(7)に述べられているので省略する。

$$\sum_{n=1}^m \left(M_{mn} \frac{dI_n}{dt} \right) + L \frac{dI_m}{dt} + V_d + r(T, B, \alpha) \cdot I_m = 0 \quad \dots (1)$$

ここで、

L : 主コイルのインダクタンス

M : コイル間の相互インダクタンス

I_m : 主コイル電流

I_n : 補正コイルの電流

V_d : 保護用ダイオードの両端の電圧

r : 主コイルのクエンチ時に発生する抵抗

T : 抵抗部の平均温度

B : 抵抗部の平均磁界

α : クエンチ後のコイル全体積に対する抵抗部の体積の割合

なお、 α は文献(7)に詳しく定義されている。抵抗部 $r(T, B, \alpha)$ は、熱伝達を考慮に入れた以下の熱方程式より評価した。

$$\gamma_{av} \cdot C_{av}(T) \cdot V_{av} \cdot \frac{d(\alpha \cdot T)}{dt} = I_m^2 \cdot r(T, B, \alpha) - h \cdot \alpha \cdot S \cdot \Delta T \quad \dots (2)$$

ここで、

γ_{av} : コイルの平均密度(kg/m³)

C_{av} : コイルの平均比熱(J/kgK)

V_{av} : コイルの体積(m³)

h : 熱伝達率(W/m²K)

S : 冷却面積(m²)

T : 冷媒温度からの温度差(K)

(1)(2)式を解くことにより、クエンチ時のコイル端子間電圧を計算できる。図3に、例えば下主コイルが先にクエンチす

図3 主コイルクエンチ時の発生電圧の計算結果

Fig.3. The calculated voltage between the terminals of the main coil when the main coil quenches

図4 コイル保護回路

Fig.4 The circuit of a coil protection system

るとした場合の、上コイルの端子ab間の電圧(図2参照)の計算結果を示す。なお、図中の黒丸は実測値であるが、これについては4章で述べる。図3から、主コイル電流が350Aの場合において、例えば片方の主コイルのみがクエンチした場合、発生電圧は約1,500Vであることが分かる。更に、片方の主コイルのクエンチ後別の主コイルが2秒遅れてクエンチした場合、即ちクエンチ遅れ時間が2秒の場合、発生電圧は800Vに低減することが分かる。

次に、常温ガスヘリウム雰囲気中で対地耐電圧試験を実施した。DC1,300Vを1分間印加し絶縁破壊がないことを確認した。

この実測結果に基づき、対地耐電圧の許容値を設定した。この値は、条件の差異による絶縁破壊の開始電圧のばらつきを考慮し、通常従来の実績を元に実測結果の8割程度の値に設定しているため、1,000Vとした。3.1節で述べた理由で対地間電圧とコイル端子間電圧はほぼ一致するため、クエンチ遅れ時間は2.5秒にする必要がある。なお、主コイルのクエンチ時のシミュレーション計算から、主コイルの最高温度は160Kから220K程度であることが確認できており、絶縁耐力は常温よりも向上する。

<3.3>コイル保護方式検討 上下主コイル間は距離及び熱的に離れており、お互い常電導伝搬しないと考えられるため、クエンチ遅れ時間を2.5秒以内にするには、クエンチしていないもう一方のコイルも強制的にクエンチさせること(強制クエンチと呼ぶ)が必要である。強制クエンチには、

図5 主コイルのBmaxとヒータの設置位置

Fig.5 The position of the Bmax of the main coil and the heater

クエンチを検出した際に、直接抵抗性のヒータに外部電源から電流を通电し、抵抗の発熱を利用して別のクエンチしていないコイルをクエンチさせるアクティブな方法と、例えば別電源の代わりにクエンチ時の誘導電圧をヒータ電源とし抵抗性ヒータに電流を通电するパッシブな方法⁽⁸⁾とが知られている。我々は、以下の点からアクティブな強制クエンチを採用した。①クエンチ電圧の検出時間、ヒータ通电時間などを自由に設定でき制御性が良い。②主コイルがクエンチする前に、低い電流値でコイル保護装置を強制動作させることが可能であり、強制クエンチの動作確認、主コイルクエンチ時の発生電圧のチェック等ができる。

なお、主コイルがクエンチした場合、補正コイルも主コイルとの相互誘導により電流が増加しクエンチするが、4極、6極補正コイルのインダクタンスはそれぞれ240mHと280mHと小さくクエンチ時の発生電圧も低い。従って、4極、6極補正コイルは特別なコイル保護対策は行っていない。

4. コイル保護装置と試験結果

<4.1>コイル保護装置 コイル保護装置は、主コイルに取り付けた抵抗性のヒータ、ヒータ電源及びコイルの発生電圧を検出しヒータ電源のON/OFFを制御するクエンチ検出器で構成した。コイル保護装置の回路を図4に示す。2台の超電導電磁石を、それぞれSCM1、SCM2とした。小型SRリング用超電導電磁石のクエンチ検出には、上下主コイルの発生電圧の差であるバランス電圧を検出する3端子法を採用

した。また、コイル保護装置には、無停電電源を接続した。無停電電源は瞬停のみならず、停電時においてコイル保護が可能な様に、15時間の停電に耐えられるバッテリー容量とした。これは、15時間以上の停電の可能性は実際面ではほとんどないと考えられること、15時間を越える停電には人為的に強制クエンチさせる充分な時間的余裕があることから決定したものである。

上下主コイルに取り付けたヒータを直列に接続した。更に、信頼性を上げるため、ヒータは電磁石1台当たり4系統とした。この内各2系統を並列に接続し、電磁石外部に取り出している。従って、電磁石1台当たり2台のクエンチ検出器とヒータ電源が存在する。ヒータの設置位置は、クエンチに必要な入熱が最小かつ常電導伝搬速度が最も速い端部コーナ部(最大経験磁界になるべく近い位置)とした。最大経験磁界(Bmax)位置及びヒータ取り付け位置を図5に示した。ヒータとして、絶縁シートに金属箔抵抗素子を挟み込んだ市販のサーモfoil型(幅15mm長さ120mm)を用いた。ヘリウム温度での抵抗値は1個当たり120Ωである。

2章で述べたコイル構造と上記ヒータをモデル化し、汎用熱計算コードで熱計算を行った。60Wのパワーをヒータに投入後、充分無視できる値である0.1秒経過後、加熱場所からMPZ(最小伝搬領域)の距離だけ離れた位置で臨界温度を超えることを確認した。これより、ヒータ1個当たりのパワーは2倍の余裕を見た120Wとした。なお、MPZの大きさは、文献(9)に記載の式で評価した結果、12mmであった。

<4.2>コイル保護装置試験結果 電磁石が完成した段階で実際の保護装置の動作試験を行った。この試験結果と3章で述べた計算結果から、長期運転に必要なクエンチ検出系のパラメータを設定することができる。

コイル電流が350Aにおいて、片側のコイルのヒータにコイル保護装置とは別の電源を接続し、このヒータに電流を通電し強制的に片側の主コイルをクエンチさせることにより、実際のクエンチを模擬した。ヒータ1個当たりのパワーを60Wとし、電流通電時間を1秒とした。実際の運転時のヒータパワーよりも小さいため、より安全側の試験となる。図3の黒丸がこの試験結果である。コイル保護装置が正常に動作し、端子間電圧が約400Vに抑えられていることが分かる。また、発生電圧はクエンチ遅れ時間が1秒の電圧にほぼ等しいことが分かる。次に、上記試験時の発生電圧の時間変化を図6に示す。この試験時、クエンチ検出器のバランス電圧の検出電圧は1Vに設定した。また、検出電圧が1Vに到達してからヒータの電源をオンにするまでの時間である検出時間を0.3秒に設定した。図6(b)から、片側のコイルを強制的にクエンチさせた後、クエンチ検出器の検出電圧まで電圧が上昇する時間は0.8秒である。従って、等価なクエンチ遅れ時間は約1.1秒程度である。実測値は、クエンチ遅れ時間1秒の時の計算値と良く一致している。

(a)各種電圧の時間依存性

(b) 図6(a)の時間軸拡大図

図6 主コイル強制クエンチ時の各種電圧の時間依存性

Fig.6 The time dependency of the voltages when the main coil is forced to quench

5. クエンチ検出時間・検出電圧の設定の検討

クエンチ時の最大コイル端子間電圧を許容値である1,000V以下にしかつ高信頼性を維持しながら長期連続運転するには、強制クエンチ用ヒータのオン条件即ちクエンチ検出器のクエンチ検出電圧及びクエンチ検出時間をいかに設定するかが重要である。以下で検出時間、電圧の設定の方法について、長期の連続運転時を考慮に入れて述べる。

<5.1>クエンチ検出電圧の設定 クエンチの早期の検出には検出電圧は低い方が良いが、検出電圧が低すぎると、ノイズやクエンチ検出器のバランス信号入力回路の長期運転時のドリフトにより、誤動作が生じる可能性がある。クエンチ検出器の入力信号が短絡状態において、クエンチ検出器の長期安定度試験(約1ヶ月)を行った結果、入力回路のドリフトは数10mV程度であった。1年以上長期連続運転することを考慮に入れて、クエンチ検出電圧は10倍以上の余裕を見て1Vに

図7 超電導電磁石の監視装置

Fig.7 The circuit for measuring the balance voltage, magnetic field, etc. of the superconducting magnets

設定した。

<5.2>クエンチ検出時間の設定 長期の永久電流モード運転時において、誤動作が最も発生しやすいのは年に数回起きる地震時である。これにより、異常なバランス信号が発生し、バランス信号をクエンチ検出器が検出し、コイル保護装置が誤動作する可能性がある。これは磁気シールドを有する超電導電磁石に特に顕著に発生する現象と考えられる。異常なバランス信号は、地震によりコイルが振動した場合、磁気シールドに対し相対的に上下主コイル位置がずれ、各コイルに発生する電圧に差が生じるため発生する。地震時の誤動作を防止するには、検出時間を地震の周期よりも十分長い時間に設定する必要がある。地震時の周波数は震源からの距離等によっても異なるとされるが、主成分の周波数は数Hzの様である⁽¹⁰⁾。例えば、95年1月17日の阪神大震災の波形の主成分は1.5Hzであった。この場合、電圧が正方向あるいは負の方向に連続して発生するバランス信号の継続時間は0.4秒程度と考えられる。クエンチ検出器の検出時間を強制クエンチ試験時に設定した0.3秒とすると、バランス信号を誤ってクエンチ検出器が検出する可能性があるが、検出時間を0.8秒に設定すれば2倍の余裕があり誤動作の可能性を小さくできる。なお、コイルサポートの機械的固有周波数の設計値は約10Hzであり、地震時にコイルサポートが機械的な共振を起こして破壊することはない。

<5.3>主コイル端子間電圧の評価 コイル片側がクエンチしてから別の片方のコイルに抵抗が発生するまでの時間すなわちクエンチ遅れ時間は、①クエンチ時にバランス電圧がクエンチ検出電圧である1Vに立ち上がる時間、②クエンチ検出器のバランス信号検出時間、③ヒータへ電流を通

図8 発生磁界の時間依存性

Fig.8 The time dependence of the magnetic field

電してからクエンチしていない別の主コイルにクエンチの芽即ち抵抗が発生するまでの時間の3種類の時間の和になる。3章で述べた様に、コイル端子間電圧を1,000V以下にするため、この時間を2.5秒以下にしたい。

まず、①の立ち上がり時間について述べる。強制クエンチ試験時には図6に示す様に、この時間は約0.8秒であった。この場合、強制クエンチ用ヒータをコイルの層方向に対し広い範囲に取り付けたため、数点からクエンチの芽が発生すると考えられる。実際のクエンチでは、1点からクエンチの芽が発生するため0.8secより遅くなる。この効果をシミュレーション計算した結果、立ち上がり時間は1.5から2倍程度遅くなること、即ち最悪1.6秒程度になる可能性があることが判明した。次に、②は上記で述べた様に0.8秒に設定した。更に、③は4章で述べた様に、0.1秒以下であり無視できる。以上より、①から③までの時間の合計は最長でも2.5秒であり、仕様を満足できる。なお、実際の運転時のヒータパワーは120Wであり、①の立ち上がり時間はより短くなり、より安全側になる。

6. 長期運転試験結果

<6.1>監視装置の構成 コイル保護装置に加え、長期運転のために備えた超電導電磁石の監視装置を図7に示す。この監視装置はバランス電圧モニタ、磁界モニタ、液体ヘリウム、シールド温度モニタ及びワークステーション(EWS)で構成した。①クエンチ検出器のバランス信号を常時モニタし、バランス信号に異常が生じた場合にトランジエントレコーダーに記録する、②超電導電磁石の正常動作を確認するため、超電導電磁石の磁界及び液面等を1時間に1回モニタし、データをEWSに取り込む等が主要な機能である。磁界測定素子は、コイル容器に取り付けたホール素子である。EWSにアクセスすればどこからでも随時モニタ可能で

ある。

<6.2>長期運転試験結果 上に述べてきたコイル保護装置及び監視装置のもと、超電導電磁石を永久電流下で安定に長期運転を行ってきた。これまでの総運転時間は約4万時間である。この間、コイルのクエンチといった不測の事態は一切発生しておらず極めて安定な電磁石動作を確認できている。同時に、万一のクエンチに備えたコイル保護装置についても、前章で述べたクエンチ検出器の最適設定により、極めて順調に運転できている。特に、阪神大震災時、兵庫県尼崎市に設置している本電磁石は震度6を経験したが、超電導電磁石にはクエンチあるいは強制クエンチ装置の誤動作等は一切生じず、本超電導電磁石のすぐれた安定性と高い信頼性が証明されている。

連続運転については、現在約1年以上の永久電流下の運転を経験中である。この間の本超電導電磁石の発生磁界の時間依存性を図8に示す。図中の白丸が実測値である。図から分かる様に発生磁界は極めて安定しており、その減衰率は0.01%/年以下であることが確認できた。この値は充分目標を満足する減衰レベルである(目標値は0.1%/年以下)。なお、図8の実測値は、コイル容器に配置したホール素子の出力をプロットしたものである。

7. まとめ

- (1) 小型SRリング用超電導電磁石のコイル保護システムを開発した。コイル保護システムは、コイルにワークエンチが生じた場合のコイル端子間の発生電圧を許容値以下にするコイル保護装置と、超電導電磁石の状態を監視する監視装置で構成した。更に、超電導電磁石の永久電流運転モードでの長期間運転を考慮し、コイル保護装置の諸パラメータの設定方法の検討を行った。これらにより、68.4Hと比較的大きなインダクタンスのコイルを備えた小型SRリング用超電導電磁石の永久電流モードでの長期間の安定運転が可能となった。
- (2) 小型SRリング用超電導電磁石の永久電流モード下の長期間の安定な運転を実証できた。現在、超電導電磁石の総運転時間は約4万時間である。また、現在約一年以上永久電流モードで連続運転している。超電導電磁石及びコイル保護装置ともに、極めて安定に動作している。
- (3) コイル保護装置は主コイルヒータ、クエンチ検出器、ヒータ電源で構成した。特に、クエンチ検出器及びヒータ電源は15時間程度の停電でも保持可能な無停電電源に接続した。このコイル保護装置により、ワークエンチが発生したとしても、主コイル端子間の最大電圧及び対地間最大電圧は、許容値の1,000Vに押さえることができる。

(平成9年9月24日受け付け、同10年5月22日再受け付け)

文献

- (1) H. Sumitani et al., "Replicating characteristics by SR lithography", SPIE, Vol. 2437, 1995, pp. 94-103
- (2) T. Nakanishi et al., "Design of a compact storage ring for industrial research", Rev. Sci. Instrum., Vol. 1, No. 63, January 1992, pp. 770 - 773
- (3) S. Yamamoto et al., "Superconducting Bending Magnets for Compact Synchrotron Radiation Source", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 3, No. 1, March 1993, pp. 821-824
- (4) T. Matsuda et al., "Field Measurements of Superconducting Bending Magnets for Compact Storage Ring", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 5, No. 2, June, 1995, pp. 871-874
- (5) 竹内・松田他, "小型SRリング用超電導電磁石", 電気学会論文誌D, Vol. 117-D, No. 10, Oct., 1997, pp. 1240-1246
- (6) 下畑 他, "NbTi線の超電導接続", 低温工学, Vol. 30, No. 2, 1995, pp. 70-75
- (7) S. Fujimura, M. Morita, "Quench Simulation of 4.7 Tesla Superconducting Magnet for Magnetic Resonance Spectroscopy", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 27, No. 2, March, 1991, pp. 2084-2087
- (8) Martin N. Wilson, "Superconducting Magnets", Clarendon Press Oxford, 1983, p. 221
- (9) Martin N. Wilson, "Superconducting Magnets", Clarendon Press Oxford, 1983, p. 76
- (10) 日本建築学会発行、丸善株式会社発売、「建築物の耐震設計資料」、p. 34

松田哲也

(正員) 1956年8月18日生まれ。81年3月京都大学大学院工学研究科金属加工工学専攻修士課程修了。同年4月 三菱電機入社。現在、先端技術総合研究所にて、主として加速器用電磁石 及び超電導電磁石、放射光装置の開発に従事。電気学会及び低温工学会 会員。

守田正夫

(正員) 1956年 7月10日生まれ。75年3月岡山県笠岡工業高等学校卒業。同年4月三菱電機入社。現在、先端技術総合研究所にて、主として超電導マグネット、超電導発電機、超電導磁気浮上などの研究に従事。電気学会及び低温工学会 会員。

山本俊二

(正員)1951年 7月3日生まれ。80年3月東京工業大学理工学研究科博士課程電気工学専攻修了。同年4月三菱電機入社。中央研究所にて、電力機器、放射光装置、超電導応用の研究に従事。現在、先端技術総合研究所開発戦略グループ。工学博士。

竹内敏恵

(正員)1965年 10月28日生まれ。88年3月大阪大学理学部数学専攻修了。同年4月三菱電機入社。中央研究所にて、超電導応用、加速器用電磁石の研究に従事。現在、先端技術総合研究所電磁システム技術部電磁気グループ。

川口武男

(非会員)1950年3月8日生まれ。68年3月鳥取工業高校電気科卒業。同年4月三菱電機入社。73年神戸技術大学機械工学講座修了。94年より理化学研究所共同研究員を兼務。現在超電導リングサイクロトロンの開発に従事。低温工学会会員

中村史朗

(正員)1949年 1月13日生まれ。72年3月九州大学工学部電気工学科修了。同年4月三菱電機入社。中央研究所にて、電磁界解析、電力機器の電磁特性、超電導応用、ビーム応用、加速器の研究に従事。現在、先端技術総合研究所電機システム技術部次長。電気学会会員及び低温工学会会員。工学博士。

山田忠利

(正員)1945年10月1日生まれ。68年3月京都大学工学部電気工学科修了。同年4月三菱電機入社。中央研究所にて、超電導マグネット、磁気浮上式鉄道、超電導発電機、磁気共鳴イメージング、放射光(SR)装置、高温超電導などの研究に従事。現在、先端技術総合研究所開発戦略グループグループリーダー。工学博士。電気学会及び低温工学会会員。

岩本雅民

(正員) 1937年11月18日生まれ。60年3月東京大学工学部電気工学科修了。同年4月三菱電機入社。中央研究所にて、超電導応用、電力機器、電磁応用の研究に従事。93年同社取締役開発本部副本部長。96年香川大学経済学部教授。97年同学工学部教授。工学博士。電気学会及び低温工学会会員。