

# NMR 直流電源調整用高抵抗負荷の開発

竹下 晃 治

Development of High-Resistance Load for DC Power Modulation of NMR Systems — by Koji Takeshita —  
 Recently, solid-state NMR systems are increasingly being utilized for research and development of new materials in both the industrial and academic fields, and this trend is no exception in the National Institute for Materials Science, which has the largest high magnetic field supply system in Japan. During an NMR analysis, a large electric power is supplied to a hybrid magnet system, but the output of a rectifier needs to be modulated to prevent the water-cooled copper magnet from being destroyed. However, because there is no load that can substitute the water-cooled copper magnet for output modulation, when an electric power for modulation is directly supplied, the water-cooled copper magnet is destroyed because of load fluctuation. Last year, Sumitomo Densetsu marketed an NMR system that requires a high degree of current stability, which resulted into the increased frequency of power output adjustment and the need to quickly develop a large current load for output adjustment. A heavy-current (35 kA), high-resistance load was successfully developed in this March by utilizing the water-cooled heavy-current bus bar technology and using water-cooled stainless steel alloy as a conductor material, and was delivered to a client.

## 1. 緒 言

近年 NMR を利用した新種素材の研究開発が、産・学を問わず急速に進められている。NMR とは、磁場中に置かれた原子核は磁場の強度によって異なった共鳴をするが、この共鳴時において電磁波の吸収あるいは放出が起こり、これにより共鳴現象を検知できる。これを核磁気共鳴 (NMR) と呼び原子核の内部構造の研究に限られていたが、近年は化学結合状態によりラーモア周波数が変化することが発見され、物質の分析の手段として用いることが考案された。

この NMR 測定には、強大で精密な磁気発生装置とこの磁界を発生するためのノイズが極めて少ない直流大電流電源設備が必要であるが、安定度が  $10^{-6}$  以下のノイズの極めて少ない直流大電流は、サイリスタを使用した直流設備では困難であった。当社は国内最大の強磁場発生装置を持つ (独) 物質・材料研究機構 (以下、物材研と記す) に於いてこの測定を可能とすべく直流電源システムの改造を行い、その電源出力調整用の実負荷 (水冷銅マグネット) の代替となる高抵抗負荷を、水冷の大電流母線技術を生かし開発納入した。本書は、高抵抗負荷の開発過程について報告するものである。

は非常に精密な電流安定精度が要求されるため、電源出力調整が必要となる。

しかし、電源出力調整時の不安定な状態で、水冷銅マグネットに電力を供給すると、マグネット本体が負荷変動により破壊される可能性があり、事実、破壊された事も幾度かあった。物材研はこれを防止するため電源出力調整時にはマグネットを使用せず、高抵抗負荷を使いマグネットと同じ特性をもった負荷があればマグネットの破壊が防止できると考え、当社にこの高抵抗負荷の開発依頼があり、今回これに成功した。

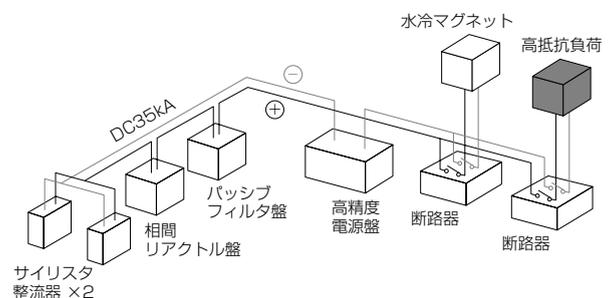


図1 高抵抗負荷接続回路図

## 2. 開発の目的

従来は水冷銅マグネットによる物質の測定には、直流電源出力調整等は特に必要ではないが、精密な NMR 測定に

### 3. 開発条件

- (1) 設置場所：電気室内  
(設置スペース 長さ8m×幅2.5m×高さ3m以内)
- (2) 定格電流：DC35kA
- (3) 出力電圧：DC330V (最低保証出力電圧)
- (4) 冷却方式：水冷方式 (純水)
- (5) 冷却水入口温度：9℃
- (6) 冷却水上昇温度：25℃
- (7) 導体温度：150℃以下
- (8) 冷却耐圧：1.0MPa (ポンプ元圧2.0MPa)
- (9) 冷却水流量：11,680 (l/min) 以下
- (10) 圧力損失：1.5MPa 以上

### 4. 開発課題

**4-1 導体 (負荷) 材料** 高抵抗負荷は実負荷である水冷銅マグネットと同等の負荷特性を要するため、DC35kA 通電時に於いて330V以上という非常に大きな電圧降下を発生させる必要がある。従って導電率が低く、尚且つ出力安定性のため温度変化による抵抗変化率が小なる材質の選定が要求された。

**4-2 水冷方式による温度解析** 水冷銅マグネットは、純水による強制水冷方式なので、この水冷銅マグネットの代わりとなる高抵抗負荷も同じ強制水冷方式を採用しなければコスト面で高価となる。従って、同じ冷却回路に接続した場合の導体本体の温度と冷却水の温度を解析する温度解析法を開発しなければならない。

**4-3 冷却回路の絶縁** 高抵抗負荷は、通電導体部に対して直接冷却水を流すため、冷却水と冷却機間の電気的絶縁構造について検討する必要がある。

### 5. 課題の検討

**5-1 導体 (負荷) 材料の検討** 今回の導体はコンパクトで尚且つ高抵抗と言う相反する条件と、更に冷却水を沸騰させない小さな発熱量で通電時に抵抗変化が小さいと言う矛盾する条件を満たす導電体が必要であった。

このため、

- (1) 導電率が低い
- (2) 温度変化による抵抗変化率が小さい
- (3) 純水仕様のため、酸化し難い金属体である事
- (4) 加工・溶接等が容易である事
- (5) 短納期のため、市販性が高い事

表1 検討導体 (金属) の特性表

No.	材料名	材料規格名	抵抗温度係数 (1/℃)	熱伝導率 (kcal/h.m.deg)	熱膨張係数 (1×10 <sup>-6</sup> /℃)	導電率 IAE (%)
1	白銅	C7060	0.00049	39.6	17.1	9.0
2	ステンレス	SUS304	0.00098	14.1	17.8	2.4

以上の条件で文献から白銅とステンレスの二つの金属体を絞り出し、更に検討を進めた。

**5-2 水冷方式による通電発熱時の温度解析** 高抵抗負荷は強制水冷導体となるため、通電時の温度平衡計算式を図2の様に仮定し、各部の温度解析を行う事とした。



対数平均温度： $\Delta TL = (Tow - Tiw) / \ln((Toc - Tiw) / (Toc - Tow))$  (Kcal/hour·m·℃)

図2 温度計算簡易モデル

(具体的計算式)

導体発熱量： $We = P \times 860$  (kcal/hour)

冷却水流量： $Q = V \times D2 / 21.22$  (l/min)

冷却水温度差： $\Delta t = We / (Q \times 60)$  (℃)

係数 Kc

$(1/Kc) = 1 / (\alpha_i \times R_i) + (1/\lambda) \times \ln(R_o/R_i)$

熱の通過量

$Wa = Kc \times 2\pi \times L \times \Delta TL$  (kcal/hour)

Tocを仮定し、We = Waで各部の温度が求められる。  
(繰り返し計算で収束させる)

但し、

P：導体発熱量 (kW/hour)

V：冷却水流速 (m/sec)

$\alpha_i$ ：冷却水の熱伝達率 (250kcal/m<sup>2</sup>·hour·℃)

$R_i$ ：冷却水路内径 (m)

$\lambda$ ：導体の熱伝達率 (kcal/m·hour·℃)

$R_o$ ：導体外径 (m)

L：冷却水路全長 (m)

この熱収束算出プログラムから二つの金属体に於けるサイズを設計し、開発条件である35kA通電で出力電圧330Vにて検討した結果が以下である。

表2 各金属に於ける35kA通電時の温度-圧力損失特性

No.	材料名	外径サイズφ (mm)	導体表面温度 (℃)	冷却水上昇温度 (℃)	導体長さ (m)	圧力損失 (Mpa)
1	白銅	φ200.0	165	30.2	80.0	0.24
2	ステンレス	φ267.4	135	23.2	60.0	0.18

導体長さ及び導体表面温度を検討した結果からは、ステンレスを採用する方が有利である事が解ったが、通常市販

のステンレスパイプで検討すると上記の様に圧力損失が0.18Mpaとなり（今回の冷却設備は既存のポンプを使用するため圧力損失が確保されないと冷却水が流れない構造から）1.5Mpaの圧力損失を確保する事は困難であった。従ってステンレスを採用するには、圧力損失を大きくし更に客先指定スペースに設置可能な省スペース型とする新たな構造が必要となった。

**5-3 冷却回路の絶縁** 導電体と水冷系統との絶縁をどうするか種々検討を行った。導電体と冷却系の接続部の末端部が冷却水圧に耐えるとともに絶縁が確保され更に、純水に対しても活性で無い塩ビ樹脂を使用する事を考え材料メーカーと打合せを重ねた結果、耐圧塩ビ樹脂を使用する事とし更に一回路に二箇所、絶縁対策を行い絶縁の二重化対策を施すこととした。

## 6. 新たに発生した課題の検討

**6-1 圧力損失の増加対策(1)** 圧力損失は冷却水貫通距離に比例するが、単純に距離を増やすと導体抵抗が増大する。このため、導体の断面積大きく取る事で単位長さ当たりの導体抵抗を小さくする事も考えたが、市販サイズから考えると現実的では無く、膨大な長さも必要であった。

そこで、当初のサイズに減圧弁を設置する事ができないかバルブメーカーに設計依頼した。しかし、267φで流量6,000L/minは流量が大きく冷却水停止時の衝撃圧力に耐える物ができず、製造が不可能との事で新たな壁に突き当たった事となった。

**6-2 設置スペースの課題** 今回の導電体を使用する配管サイズに267φを考え、全体の配置と必要スペースを検討した。この結果、導体の曲げ半径に800mm必要である事が解り導体配列から設置スペースを検討するとスペース的にも入らないと言う問題点も判明した。

**6-3 問題点の検討** 検討途中で二つの問題点が解り、世界的にもこの様な大きな高抵抗負荷が無い事から製

作が不可能では無いかと考えていた。しかし、何とか圧力損失を確保し抵抗値も当初の検討値程度に納まらないかと考えていた時、導体内径を小さくし導体を並列回路に分割する事で対策できないか考え、スペース他を再検討する事とした。

この検討図を図3に示す。この結果、配管サイズが165φとなり製造面に於いても、電気的にも実現可能である事が解り、更に減圧弁についても165φで3,000L/minであれば製造可能との事で解決できる目処ができた。

**6-4 機械的強度の検討** 今回の検討で並列回路にしたため、導体本数が増加した事から配置的に更にコンパクトにする必要があった。しかし、単純に導体配置をする大電流であるためと究極に小さい相間距離から強大な電磁力が発生し導体が機械的に耐える事ができない事がわかった。

このため、電磁力をお互いに打ち消しあう原理を利用し、各導体の相を千鳥配列間とし、導体間距離を小さくしつつ電磁力を打ち消しあう図4の様な導体配列を採用する事とした。

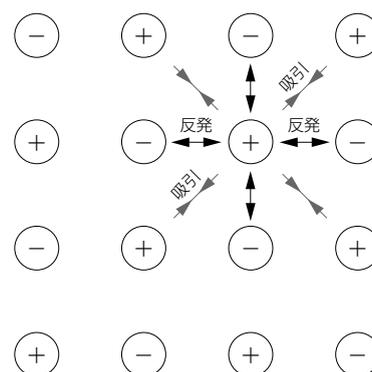


図4 導体配置

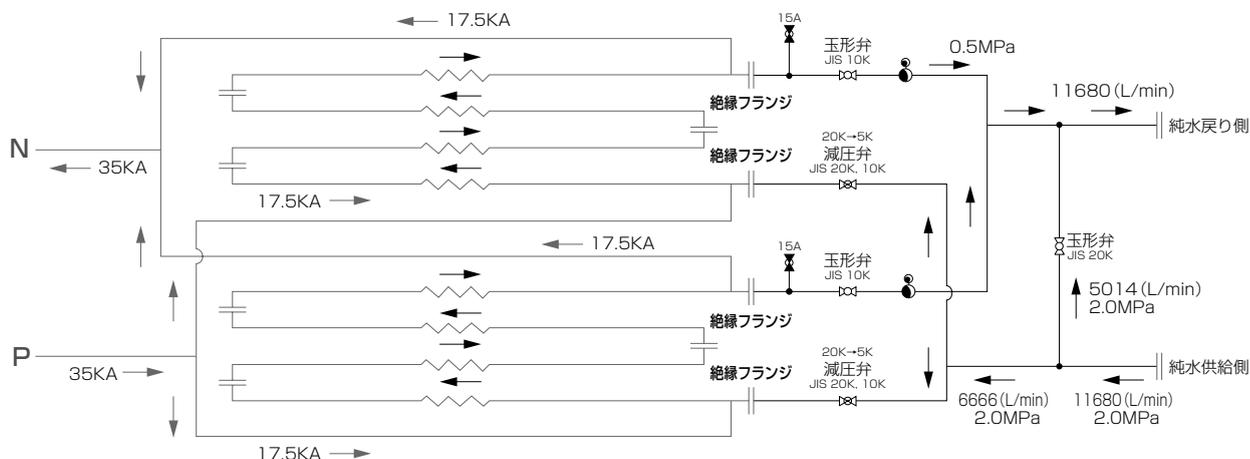


図3 並列回路による電気系統及び冷却水系統図

また、導体支持部にEPゴムを取付、絶縁すると共に電磁力による機械的な振動・衝撃を吸収出来る構造とし二重安全対策を施した。

## 7. 設計検証

これらの対策が満足するか、最終設計段階の検証を行った結果を表3に示す。

表3 最終検証 (電流値 = 17.5kA × 2系統)

材質	外径φ (mm)	肉厚t (mm)	導体表面温度 (°C)	冷却水上昇温度 (°C)	導体長さ (m)	圧力損失 (Mpa)	出力電圧 (V)
SUS304	165.2	3.0	126.5	24.8	40.8	1.56	368.5

客先指定冷却水上昇温度 25℃を基準に検討を行った結果、導体部長さ 40.8mにて出力電圧 368.5Vとなり、最低保証出力電圧の 330Vも上回り、また導体表面温度も 150℃以下となり設計目標値を満足する結果となった。

更に、縮小モデルに於いて試験を行い問題点が無いか確認する事で納入後のトラブル発生を回避する事とした。縮小モデルとして 10m 分の高抵抗負荷を製作し、客先設備により 5,000A 実通電試験にて試験を行った。この結果を表4に示す。

表4 縮小モデルに於ける計算結果の比較 電流：DC5kA

材質	冷却水上昇温度 (°C)	導体表面温度 (°C)	出力電圧
実測結果	0.3	16.2	23.1
計算結果	0.5	18.1	23.5

この結果、計算結果と温度測定結果の間に大きな誤差は無く、各部温度については、計算結果より実測値の方が少し低くなる事が確認された。これは温度算出条件に周囲への放熱を考慮しない最悪条件にて行ったためと推測され安全サイドに検討されている事も実証した。この結果から、今回の設計で客先の要求する高抵抗負荷の開発ができると考えた。

## 8. 高抵抗負荷の開発

これらの検討を行って開発した高抵抗負荷を図5、写真1に示す。

また、この高抵抗負荷に実負荷通電した結果は図6のとおりである。35kA 通電時に於いて冷却水上昇温度は 18℃、導体表面温度は 112.2℃、出力電圧は 362Vとなり、出力特性も電流値に比例し直線的で安定抵抗である事から、今回開発品で客先要求性能を満足する事が確認、実証された。

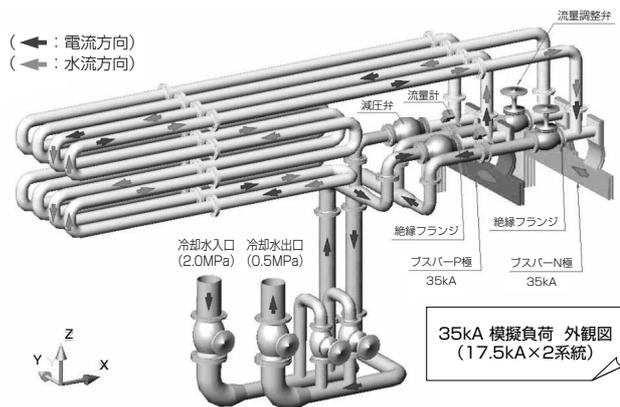


図5 高抵抗負荷立体図

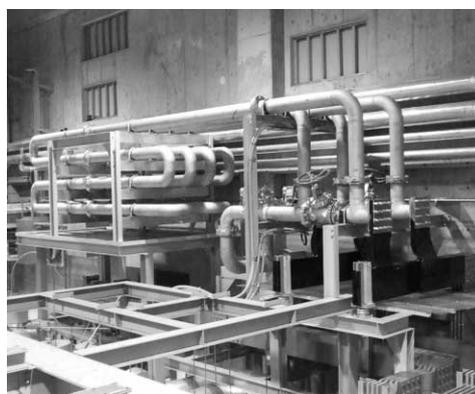


写真1 高抵抗負荷

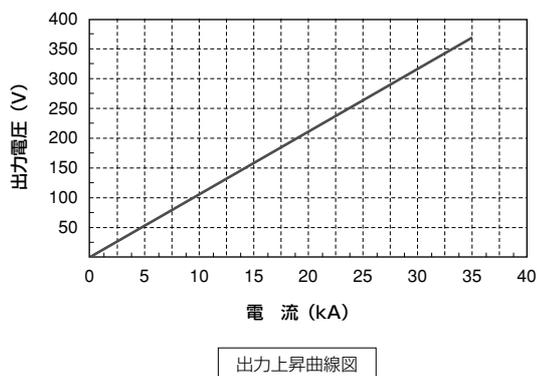


図6 出力電圧特性グラフ

## 9. 結 言

今後、更なる精度を確保するNMRの為に客先より次の2点の要求(課題)が既に上げられている。

- ①定格電流時の出力調整が可能である事  
(抵抗値変化による出力電圧自動調整方法)

## ②冷却水の圧力及び水量の自動調整

これらの課題については更に今後、開発・検討を進める所存である。

今回、国内で始めて、また35kA330Vの規模では世界で始めて開発に成功した事から、新たな開発依頼も頂き今後のNMRの発展に寄与できればと考える。最後に本開発に際し、ご協力いただいた（独法）物質・材料研究機構・強磁場研究センターの皆様に深く感謝致します。

## 用語集

---

### NMR：核磁気共鳴

外部静磁場に置かれた原子核が固有の周波数の電磁波と相互作用する現象である。この固有の周波数が分子内でのその原子の環境によってわずかに変化する事を利用し、物質の分析する方法を核磁気共鳴分光法と呼ぶ。核磁気共鳴分光法のこと単にNMR法と略称することがある。

コンピューター断層撮影法に応用した方法が核磁気共鳴画像法（MRI）である。

### 物質・材料研究機構

茨城県つくば市にある独立行政法人の研究所。2001年4月に金属材料技術研究所と無機材質研究所が合併して誕生した。以下の4点を重点研究分野としている。

- ・ナノ物質・材料
- ・環境・エネルギー材料
- ・安全材料
- ・研究基盤・知的基盤の充実

### ラーモア周波数

原子番号と質量数がともに偶数でない原子核は0でない核スピン量子数  $I$  と磁気双極子 | 磁気双極子モーメントを持ち、その原子は小さな磁石と見なすことができる。磁石に対して磁場をかけると磁石は磁場ベクトルの周りを一定の周波数で歳差運動する。原子核も同様に磁気双極子モーメントが歳差運動を行なう。この原子核の磁気双極子モーメントの歳差運動の周波数はラーモア周波数（Larmor frequency）と呼ばれる。

## 参考文献

---

- (1) 大学演習 電熱工学（東京大学）
  - (2) 伸銅品データブック（日本伸銅協会）
  - (3) JIS非鉄ハンドブック（日本規格協会）
  - (4) JIS非鉄ハンドブック（日本規格協会）
- 

## 執筆者

---

竹下 晃治：住友電設(株) 電力事業部 変電部

---