

# 超音波センサーを用いた超電導機器の状態推定

## 超電導機器を非侵襲計測でモニターする

超電導は、エネルギー、医療、物理学などのさまざまな分野で応用されているが、利用の増加に伴い超電導機器が抱える特別な問題の解決が重要な課題となってきた。産総研では、超音波センサ (AE) を用いて超電導機器の状態を計測する技術の研究をしている。その成果を、交流超電導コイルや国際熱核融合実験炉計画で開発されたセントラルソレノイドモデルコイルなどに適用してきたが、他の方法では得ることができない新しい知見を得た。

Superconducting devices have been playing very important roles in various area of our life, e.g., energy technology, medical science and physics. Performance of the devices is restricted by temperature, current, magnetic field and electromagnetic forces, etc. In order to improve superconducting devices, various development is necessary for those factors. Acoustic emission (AE) method has unique advantages, i.e., it can monitor global information of superconducting devices without disturbing their electrical insulation, contributing to development of superconducting devices. We have been developing the AE methods for the application to alternating current superconducting coils which require higher performance than that of direct current superconducting coils. A large-scale superconducting coils including Central Solenoid model coil developed in International Thermonuclear Experimental Reactor program were also monitored by the AE methods, and new results have been obtained.

新井 和昭 Kazuaki Arai  
kazuaki-arai@aist.go.jp

エネルギー技術研究部門  
エネルギーネットワークグループ  
主任研究員

これまで、大型高磁界超電導コイルなどの大電磁力場を念頭に、主に金属間化合物超電導材料の試料をスパッタリングなどを用いて作製し、高磁界・高電磁力場での特性向上と分析評価を行ってきた。また、高磁界、高速心力場における超電導線材や超電導コイルの電磁的・機械的安定性の評価を行っており、AE法による評価研究もその一環として実施した。このテーマについては、これらの手法を複合的に適用して材料の視点とシステムのアプローチで研究を行っている。



### 超電導機器について

超電導は、電力ネットワークにおける超電導限流器、磁場閉じ込め方式の核融合炉における超電導コイル、医療分野でのMRIや分子構造解析に使われるNMR、高エネルギー物理学での加速器などさまざまな分野で利用されている。これらの機器は、非常に強力な磁気力や大電流を高いエネルギー効率で利用する必要があるため、超電導がなければ成立しないものが多い。各種の超電導機器は、研究の初期段階のものからすでに事業化しているものまで研究開発の進捗はさまざまであるが、超電導材料の電気抵抗をゼロにするた

めに液体窒素 (-195.8℃) や液体ヘリウム (-268.9℃) などで冷却することが前提である。さらに、電流、磁界、電磁力などから要求される種々の条件をクリアすることにより、超電導機器を構成することができる。

### AEを利用した機器計測

最近では、50 Hz、60 Hzの商用交流周波数で利用できる超電導機器が研究されている。交流応用では、超電導に対する要求は厳しくなりその信頼性の確保が重要となる。そこで、超電導コイル内部の電気絶縁の確保など、超電導部に影響を与えない非侵襲の計測手

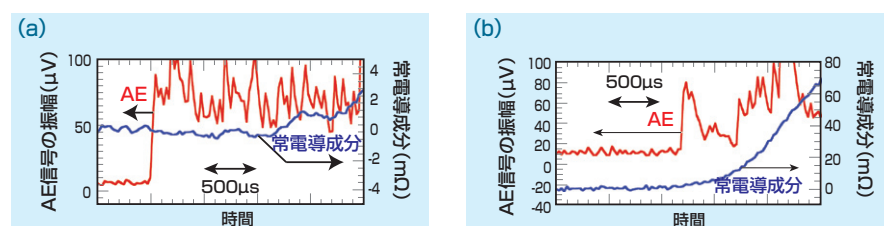


図1 交流超電導コイルのAE信号の発生例

200 ~ 260A 程度の50Hz交流電流が流れている超電導コイルが超電導状態から常電導状態に移る瞬間を示す。常電導転移のパターンの違いが、AE信号の違いに反映されている。

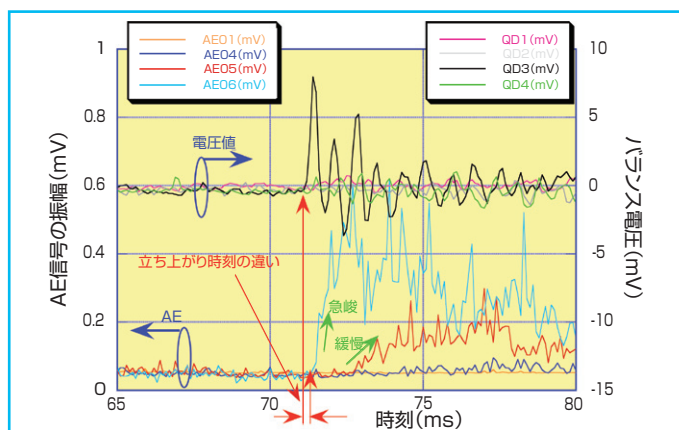


図2 大型超電導コイルのAE信号の展開と電圧信号との関連を示す例。マルチチャンネルにより数十分程度の連続計測を行った際のデータの一部を示す。バランス電圧は、1組の超電導コイルユニットにおける、誘導電圧の不平衡の度合いを示す。赤の矢印は、AE信号とバランス電圧の立ち上がり時間に時間差があることを示すが、これらとAEセンサーの位置及びバランス電圧の計測範囲から、超電導導体内部の超電導ケーブルの再配置が起こる位置についての情報を得ることができる。

法として、また、短時間に急激に変化する現象を敏感に抽出する技術としてAEを利用した計測技術が重要となる。(AE: Acoustic Emission。ここでは、超電導コイルなどの状態変化によって生じる超音波を利用している。)

われわれの研究は、液体ヘリウム(-268.9℃)での使用に耐え、微小な信号を検出できるセンサーの試作から始まり、データを多面的に評価するための高サンプリング・多チャンネル・長時間計測のシステムを構築、種々の交流超電導コイルを極低温の中で動作させて計測を行った。その結果、AE信号のいくつかの発生原因やそのメカニズムなどがわかってきた。

図1には、その簡単な一例を示す。(a)は、50Hzの交流電流が比較的低い場合に超電導コイルの内部に常電導を誘発する擾乱から生じたAE信号を示している。(b)は、高電流領域において、通電電流が超電導状態を保つことができる電流を超過した瞬間の状況を示し、常電導の発生とともに誘起されたAEを示している。(a)に示す、常電導発生前のAE信号は常電導への転移を引き起こす原因(温度上昇時に結びつくコイル含浸材の微小なクラック)に起因しており、それがどの時点で発生したかなどの情報を得ることができるが、これは他の方法では検出できない。

この例の他に、AEセンサーの多チャンネル化と電圧信号との複合化により、種々の超電導コイルの状態分析の際、AE信号によって擾乱の位置が推定できること、常電導への転移に結びつく前駆的な現象(交流に特有な瞬間的な常電導成分の出現)を捉えることができること、交流通電時の超電導線材の動的挙動と安定性の限界との関連が明らかになった。

### 本AE技術の核融合分野への実用例

これらの手法を大型超電導コイルへ適用した例として、ITER(International Thermonuclear Experimental Reactor、国際熱核融合実験炉)において将来の核融合炉用超電導コイルの基本技術を集めたCSモデルコイル(Central Solenoid model coil)の励磁試験においてAE計測を組み込んだ測定を行い、この手法の適用可能性について検証を行った。CSモデルコイルは、プラズマ電流の誘導に必要な超電導コイルの検証のために日本原子力研究所が中心になって開発した、外径約

3.6 m、高さ約3 m、蓄積エネルギー640MJの世界最大級の超電導コイルである。

この超電導コイルのAE信号、電圧信号、電流信号など等を複合的に高時間分解能で多チャンネルで計測し、超電導コイル各部がダイナミックに変化する状況を時間的・空間的に捉えた。図2はその一例で、電磁力が漸次増加する過程において超電導ケーブルが再配置する瞬間のAE信号とバランス電圧の時間変化を示している。

またこの他に次の知見が得られた。(1)複数のAE信号のエネルギー評価量によって超電導コイルの励磁サイクルごとに、安定性(擾乱)がどのレベルに位置するか、(2)昇温サイクルを経験した超電導コイルが、以前の励磁過程をどの程度記憶しているかを定量的に評価できることを実験的に確かめた。(3)核融合炉用超電導導体の素線間のカップリングロスの低減現象とAEとの相関性が認められ、超電導導体の再配置とロス低減の関連を示すデータも得られている。

#### 関連情報:

- 共同研究者: 海保勝之、津川一仁、梅田政一、山口浩(エネルギー技術研究部門)、石郷岡猛、二ノ宮晃(成蹊大学)、中嶋秀夫、高野克敏(日本原子力研究所)及びそのグループの方々。
- K. Arai et al.: Cryogenics, Vol. 44, No. 1, p.15-27 (2004).
- A. Ninomiya et al.: IEEE Trans. Appl. Supercon., Vol. 13, No. 2, p.1408-1411 (2003).
- K. Arai et al.: IEEE Trans. Appl. Supercon., Vol. 10, No. 1, p. 685-688 (2000).
- K. Arai et al.: J. Appl. Phys., Vol. 85, No. 8, p.4250-4255 (1999).