

掲載内容（サマリー）：

特集：超電導エレクトロニクス・通信・検出器分野

- 超伝導マイクロ波・光デバイスの技術動向
 - 超伝導トンネル接合を用いたマイクロ波帯雑音源の開発
 - 5 GHz 帯気象レーダ用超電導受信フィルタの開発
 - 超伝導検出器を搭載した先端計測技術の動向
 - TES 型 X 線マイクロカロリメータで拓く宇宙観測
 - STJ-X 線検出器で拓く放射光計測
 - STJ- 分子検出器による質量分析
-
- 超電導関連 2011 年 2-3 月の催し物案内
 - 新聞ヘッドライン（12/17-1/17）
 - 超電導速報—世界の動き（2010 年 12 月）
 - 隔月連載記事—やさしい超電導リニアモーターカーのお話（その 1）
 - 読者の広場(Q&A)—ニホウ化マグネシウム超電導膜の高速合成に成功したと聞きましたが、どのような製造法でしょうか？

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導 Web21

〈発行者〉

財団法人 国際超電導産業技術研究センター 超電導 Web21 編集局

〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13

Tel (03) 3536-7283 Fax(03) 3536-7318

超電導 Web21 トップページ：<http://www.istec.or.jp/web21/web21.html>



この「超電導 Web21」は、競輪の補助金を受けて作成したものです。

<http://ringring-keirin.jp>

特集：超電導エレクトロニクス-通信・検出器分野

「超伝導マイクロ波・光デバイスの技術動向」

山形大学大学院
理工学研究科
教授 大嶋重利

今年、超電導が発見されてから丁度 100 年目を迎える。1911 年 4 月 8 日にオランダのライデン大学で超電導現象が発見されたので、同大学では、4 月 8 日に

「CELEBRATION: 100 YEARS OF SUPERCONDUCTIVITY」

を開催する企画を立てている。是非参加したいと思っている。また、高温超電導体が発見されてから 25 年目を迎えるので、そのような年に、超伝導マイクロ波・光デバイスの技術動向を振り返ってみるのは、考え深いことである。

マイクロ波から光までの電磁波を制御・センシングする超伝導デバイスは ①超伝導バンドパスフィルタ ②テラヘルツ波検出器 ③X 線検出器 ④中性子線検出器 ⑤放射線検出器などがある。このうち、超伝導バンドパスフィルタと X 線検出器は既に実用化され活躍している。またテラヘルツ波検出器、中性子線検出器、放射線検出器は有望な実用デバイスとして注目され、現在精力的に研究されている。本特集でも、気象レーダ用超伝導フィルタの開発（東芝 加屋野氏）、TES-X 線検出器（JAX-ISAS 満田氏）などの記事が掲載されるので、それらについては、各氏の記事を参考にさせていただきたい。また、超伝導検出器については産総研の大久保氏が解説するので、私は次の 2 つのマイクロ波超伝導デバイスについて述べてみたい。

1. 超伝導フィルタの新たな応用—UWB 通信用超伝導バンドパスフィルタ

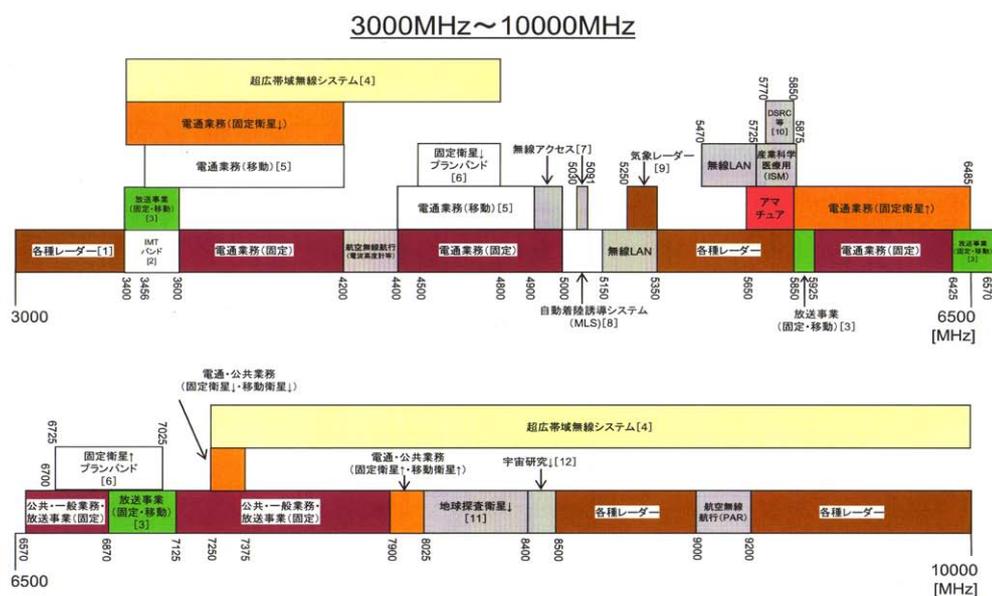


図 1 3~10 GHz 帯における周波数の利用状況 (日本) ¹⁾

アメリカ連邦通信委員会は今まで軍用にしか利用を認めていなかった Ultra Wide Band (UWB) 通信を、民間にも開放することにし、それに伴い UWB 通信の国際規格が提案され認可された。日本では UWB 通信の周波数帯を 3.4~4.8 GHz, 7.25~10.25 GHz に振り分けた(図1)¹⁾。しかし、この周波数帯ではすでに他の無線通信が稼働しており、それらのシステムとの混信を防ぐ必要がある。超伝導フィルタは、低損失、高周波数選択制に加えて、小型の広帯域フィルタの設計も可能である。従って、現在色々なタイプの UWB 通信用フィルタが提案されている。図2に埼玉大学の馬教授らが報告している UWB 用フィルタの特性結果を示す²⁾。超広帯域で優れた特性を示すバンドパスフィルタである。

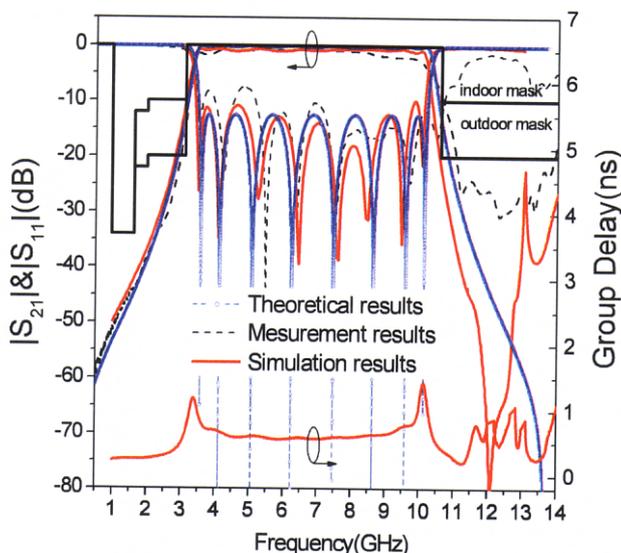


図2 UWB 通信用超広帯域バンドパスフィルタの特性²⁾

2. Microwave Kinetic Inductance Detectors (MKIDs)

光から X 線までの光子を検出するデバイスとして MKIDs が盛んに研究されるようになってきた。特に、最近テラヘルツ波の検出器として注目されるようになってきている。その原理は、共振器に光子が入射された時、クーパーペアが破壊され、その共振周波数が変化し、その周波数変化を測定することにより、光から X 線までの光子を検出するものである。構造もシンプルであり、また GHz の共振器を構成すればよいので、測定も簡便である。マイクロ波の共振器を研究している我々も、MKIDs には大変興味を持っている。特に、Lumped Element Kinetic Inductance Detectors (LEKIDs) は、超伝導フィルタと同様な手法で設計できるので、興味がある。図3に S. Doyle らが報告している LEKIDs の等価回路図を示す³⁾。メアンダー型の集中 L とくし型構造の C を用いた共振器が基本構造となっている。約 6.5 GHz の共振周波数を持ち、また、サイズも 0.3 mm 角程度と小さく、アレイ化も容易であると報告している。

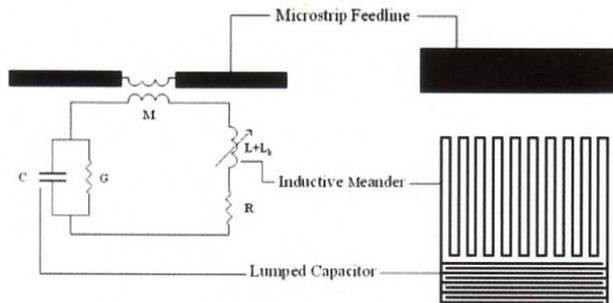


図3 LC 集中回路を用いた MKIDs の等価回路³⁾

超伝導マイクロ波・光デバイスは、既に実用化されているものもあり、また今後実用化が強く望めるものもある。しかし、真に実用化を狙うためには、他の競合デバイスと比較して、性能、操作性、価格等で勝る必要がある。それが一番難しいのであるが、それに打ち勝ち、新たな実用化デバイスが出現することを祈っている。

参考文献：

- 1) <http://www.tele.soumu.go.jp/j/adm/freq/search/myuse/use/index.htm>
- 2) Zhewang Ma *et al*, " New Progress in the Development of Compact High-Performance Microwave Ultra-Wideband (UWB) Filters, 2009 IEEE International Symposium on Radio-Frequency Integration Technology (RFIT2009)
- 3) S. Doyle *et al* " Lumped Element Kinetic Inductance Detectors, J. Low Temp. Physics 151 (2008) 530-536.

[超電導 Web21 トップページ](#)

特集：超電導エレクトロニクス-通信・検出器分野

「超伝導トンネル接合を用いたマイクロ波帯雑音源の開発」

東京大学大学院
理学系研究科
井上裕文

マイクロ波帯の冷却低雑音増幅器は電波天文学で用いられる検出器の初段、または二段目に位置する主要な構成要素である。世界各国の研究機関で広帯域化・低雑音化を目指し開発が進められており、現在では等価温度にして数 K という超低雑音特性を持つものも登場している。しかし低雑音化が進むとともに、相対的に測定誤差が大きくなり問題となってきた。

一般に、増幅器の性能を表わす雑音指数（雑音温度）の測定は増幅器に二つの異なる電力（等価温度）の参照信号を入力し、その応答を調べることにより行う。この参照信号の電力は増幅器の持つ微小な雑音と同程度であることが望ましく、既存の方法ではアバランシェダイオードの出力を減衰器で約 1/100 にすることにより参照信号を作り出す。しかしアバランシェダイオードと増幅器の間にある減衰器やケーブルの損失や、減衰器の物理温度に起因する誤差が大きい（十数%）という問題があるため、参照信号源と増幅器を直結でき、かつ物理温度に依存しない方法が望まれている。

超伝導トンネル接合（以下 SIS 接合）に電圧をかけるとバイアス電圧に比例した微小な電力のショットノイズを出力するため参照信号源として利用できる可能性を秘めている。SIS 接合を参照信号源として用いた場合、増幅器と直結でき、物理温度に依存しないため高精度な雑音測定（誤差 3%）が可能となる。それだけでなく出力電力を電圧制御できるために増幅器の線形性の評価にも用いることができる。

このような背景のもと、SIS 接合を用いた参照信号源の開発を行った。図 1 に制作した参照信号源を示す。参照信号源は SIS 素子と筐体から構成される。設計の際には SIS 接合で発生するショットノイズを損失・反射なく増幅器に伝えるよう注意した。SIS 接合は Nb-Al/AlOx-Nb 接合を採用し、接合自身の幾何的容量を抑えるためにサイズを $1 \times 1 \mu\text{m}^2$ とした。また被測定物との整合をとるために、バリアの酸化条件を調節し常伝導抵抗を 50Ω とした。

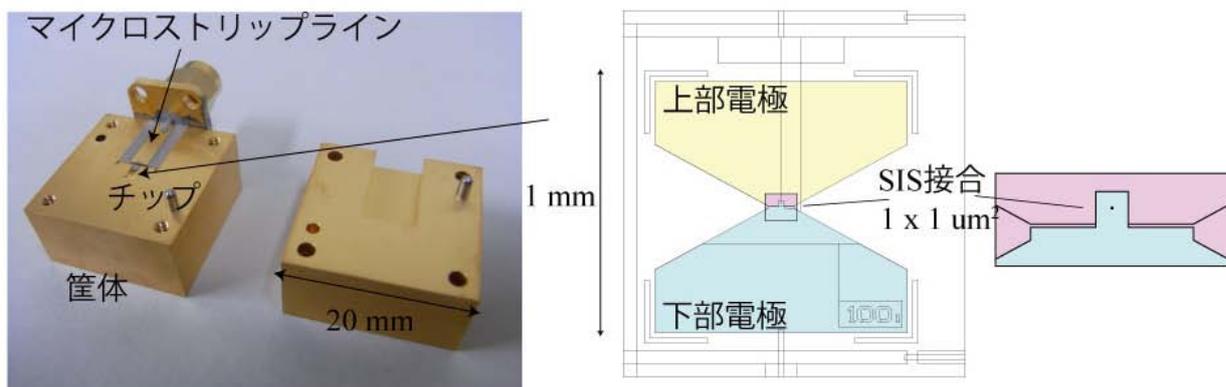


図 1. 開発した参照信号源。(右) 筐体と SIS チップ。(左) SIS チップ。
SIS チップは上部電極、下部電極、SIS 接合からなる。

制作した SIS 雑音源を用いて冷却低雑音増幅器の特性評価を行い、既存の常温のダイオード雑音源と冷却減衰器を用いる方法と比較した(図2)。被測定物と直結でき、物理温度に依存しないため、測定誤差は SIS 雑音源を用いた方(赤)が既存の方法(緑)よりもずっと小さい。見積もられた雑音温度は SIS 雑音源を用いた方が 1.5 K 程度系統的に高いという結果が得られたが、この違いは既存の方法で用いた同軸型冷却減衰器の外部導体と内部導体の物理温度の差によるものと考えられる。

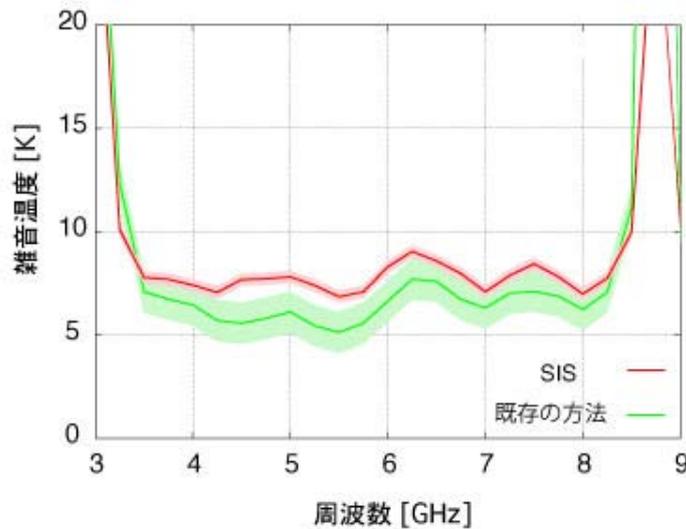


図2. 冷却増幅器の特性評価の比較。SIS 参照信号源を用いた結果(赤)とダイオード雑音源を用いた結果(緑)。帯は測定誤差を表す。

現在はこの SIS 参照信号源を高周波に拡張し、ミリ波帯での実現に取り組んでいる。ミリ波帯でもこのような参照信号源が実現すれば、電波天文学における天体信号の温度較正をはじめとするさまざまな応用が期待される。

[超電導 Web21 トップページ](#)

特集：超電導エレクトロニクス-通信・検出器分野
「5 GHz 帯気象レーダ用超電導受信フィルタの開発」

株式会社東芝
研究開発センター機能材料ラボラトリー
加屋野博幸

昨今、デジタルテレビ、携帯電話、無線 LAN 等の電波を利用する機器の利用が拡大し、将来の高速通信網構築への要求も高まっている。これに伴い限られた周波数資源を有効に利用し、適正な電波利用環境を確保することがますます重要な課題となりつつある。特に 5 GHz 帯においては、近年の無線 LAN の爆発的な利用増加のため、周波数の有効利用が急務となっている。弊社では、5 GHz 帯無線 LAN の周波数帯域拡大を想定し、隣接する 5 GHz 帯気象レーダシステムの狭帯域化のための研究開発を進めている。現在の気象観測システムとしては広範囲の雲の観測を行う気象衛星とポイント雨量観測を行うアメダスと短時間の風雨観測を行う気象レーダが用いられている (図 1 参照)。

今回開発した技術は、気象レーダ網構築のために多くの気象レーダを少ない周波数帯域で運用するための受信用の狭帯域超電導フィルタである。これを使用することにより、狭帯域化された信号を高密度に周波数軸上に配置した場合にも、目的の信号のみを混信なく受信することが可能となる。

図 2 に示すように、従来フィルタのようにシステム帯域を切り取るフィルタでは従来技術である空洞共振器を用いても十分に低損失なフィルタを実現することができた。しかし、周波数軸上に高密度に配置した信号から混信無く受信するためには狭帯域なフィルタが必要であり、超電導材料が持つ低損失な特性を用いないと低損失なフィルタを実現することができない。従来我々はヘアピン型超電導共振器を用いたフィルタを試作していたが、さらなる低損失へのニーズが高いことから研究を進めてきた。そしてヘアピン型共振器の屈曲部の問題点を除去した平行二線型超電導共振器を用いたフィルタを開発した (図 3 参照)。共振器

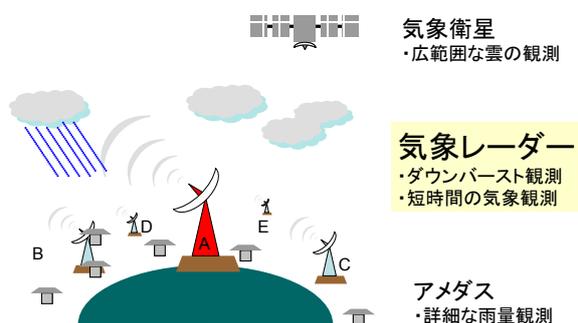


図 1 気象観測システム

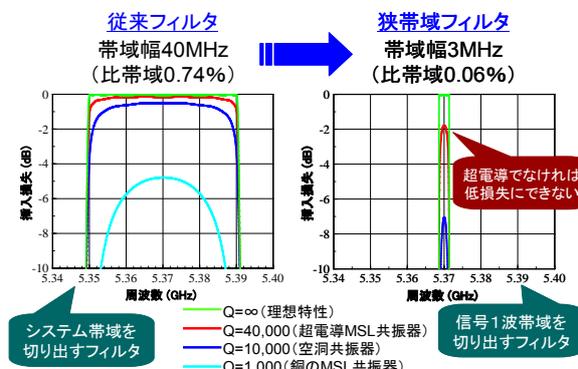


図 2 超電導フィルタの利点

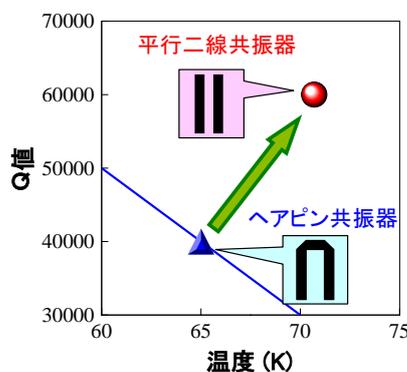


図 3 共振器の Q 値比較

の性能パラメータである無負荷 Q 値(Q_u) を倍に改善し、フィルタの挿入損失を約 1dB と半減することができた (図 4 参照)¹⁾。このフィルタでは、従来の 4 倍の信号密度 (2.5 MHz 間隔) でシステム運用したときでも、目的とする信号のみを分離し、隣接混信波を 30 dB 以上抑圧することが可能である。

また現在、この受信フィルタ開発と並行して、送信側にも適用可能な kW オーダーの高耐電力特性を持つ送信用狭帯域フィルタ技術の開発も進めている。

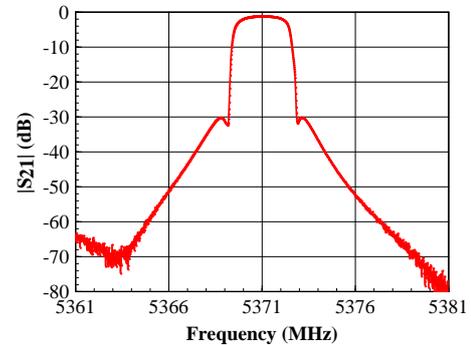


図 4 周波数特性

参考文献：

- 1) 河口, *et al.* “5GHz 帯気象レーダ用超電導受信フィルタの開発,” 信学技報, MW2010-6, 2010

特集：超電導エレクトロニクス-通信・検出器分野

「超伝導検出器を搭載した先端計測技術の動向」

独立行政法人産業技術総合研究所
計測フロンティア研究部門
副研究部門長 大久保雅隆

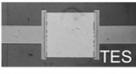
1. はじめに

超伝導現象を使った計測技術としては、電磁波の検波検出をおこなう SIS ミキサや、磁場計測の SQUID が良く知られている。これらは、コヒーレント検出器というカテゴリーに分類することができる。コヒーレント検出については優れた他の報告に譲るとして、本稿では近年発達してきた「直接型超伝導検出器」の動向について述べる。コヒーレント検出が、波の検出や、磁束といった物理量を計測するのに対して、直接検出は、光子やフォノンといった量子に感度があり、光子、原子、分子といった粒子を 1 個ずつ、100 %に近い検出感度で検出できる。また、赤外域からγ線の光子エネルギー (hv) や、原子分子からタンパク質のような巨大分子の運動エネルギー (1/2 mv²) を従来技術では不可能な高い精度で測定可能になる。これらの検出性能は、既存技術の限界を超えるものであり、ライフイノベーション、グリーンイノベーションを加速するために、コヒーレントと直接の両方を加味した IEC 標準化による普及の促進を図るべき時期である。

2. 超伝導検出器の種類

直接検出と言われるタイプの超伝導検出器は、1980 年初頭から本格的に開発が始まった。ここ 10 年、急速に発達している。直接検出には、大別すると熱型検出器と量子型検出器の 2 種類がある。熱型超伝導検出器は、鋭い超伝導転移を温度計として用いて、例えば光子 1 個の吸収による温度上昇を測定するカロリメータである。温度計は、超伝導転移端センサー (Transition edge sensor: TES) と呼ばれる。量子型検出器は、放射線の入射を直接電気信号に変換するもので、クーパ対が破壊されて生成される準粒子を超伝導トンネル接合 (Superconducting Tunnel Junction :STJ)により測定する。これらに加えて、一方の電極が常伝導金属である接合 (Normal-Insulator-Superconductor: NIS)、準粒子が生成されたときの表面抵抗変化を使うマイクロ波力学インダクタンス検出器 (Microwave kinetic inductance detector: MKID)、常磁性体の磁化温度変化を使う金属磁気カロリメータ (Metallic Magnetic Calorimeter: MMC)、超伝導ナノ構造の常伝導状態への転移を使うナノストリップ検出器 (Superconducting Single Photon Detector: SSPD or Superconducting nano-Strip-Line Detector: SSLD) など多くのタイプの超伝導検出器が開発されてきている。これらの超伝導検出器を分光能力、応答時間、動作温度について整理すると表 1 のようになる。大まかに

表 1. 超伝導検出器の分光能力、応答時間、動作温度

	Type	Spectral resolution (photons)	Time response	Operation Temp.
	Calorimeter (TES, SPT, MMC)	Extremely high (1.2 eV@ 6 keV) (0.15 eV@ 1 eV)	Slow (1 ms)	< 0.1 K
	Junction (STJ, NIS)	High (12 eV@ 6 keV) (0.14@ 2.5 eV)	Fast (1 μs)	0.3 K
	Nanostrip (SSPD, SSLD)	N/A or Low (0.55 eV @ 1eV)	Extremely fast (1 ns)	> 4.2 K

は、TES は分光能力が極めて高いが遅い、STJ は分光能力が高く速い、SSPD は分光能力がないが極めて速いと言える。ナノストリップは、当初赤外域の光子検出のみであったが、近年、生体分子、電子、プラズモンといった観測対象へ広がりを見せている。

3. 直接検出型超伝導検出器の応用

表 1 にあるように、直接検出型超伝導検出器の動作温度はほとんどの場合 4 K 以下で、0.1 K とした極めて低い温度環境が必要とされる場合もある。4-77 K で動作するコヒーレント検出器と比較して、一般のユーザーが手軽に使うことは極めて困難であった。しかし、近年、液体ヘリウムの供給を必要としない冷凍技術などの周辺技術の進歩が追い風となり、超伝導検出器の動作原理について研究する段階から超伝導を使って試料を分析する応用の段階に突入していると言える。

応用の一例として、我々が開発した超伝導分子検出器搭載の質量分析装置の例を図 2 に示す。この装置の例では、GM 冷凍機（あるいはパルスチューブ冷凍機）で 3 K を作り、閉サイクルの 3He を液化、減圧することより 0.3 K を電力の投入だけで得ることができる。検出器や配線を実装した状態で数日間 0.3 K を保持する連続運転が可能であり、液体 3He が全て気化した場合でも数時間後には再度 0.3 K を得ることができる。冷却サイクルは自動化し、ユーザーが検出器の冷却に煩わされることはない。MALDI イオン化法により、生体分子を壊さずにイオン化し、一定電圧で加速後にある距離を飛行したイオンが、超伝導検出器で検出される。Field Programmable Gate Array (FPGA) ベースの Digital Signal Processing (DSP) により、イオンの飛行時間とイオンの運動エネルギーを同時に測定する。従来の質量分析では質量/電荷数比(m/z) でイオンを分離していたため、 m を一意に決めることができなかつた。超伝導検出器を使うと、運動エネルギーから z が分かるため、 m を一意に決定できる真の質量分析を実現できる。産業技術総合研究所では、この装置に加えて複数の超伝導検出器搭載質量分析装置を公開している(<http://open-innovation.jp/ibec/device/> のナノ計測にリストアップされている)。

超伝導検出器を使用した分析技術の他の例としては、走査型電子顕微鏡や透過型電子顕微鏡における電子ビーム励起の X 線分析、蛍光 X 線分析、蛍光収量 X 線吸収微細構造 (X-ray Absorption Fine Structure: XAFS) 分光、 α 線分光、 γ 線分光などがある。また、分析装置ではないが、量子暗号通信、X 線天体観測、暗黒物質探索、ニュートリノ物理などの通信分野や基礎科学分野の先端的計測においても活用されている。基礎科学から産業計測において、今後超電導センサーが計測ボトルネックを解消し、イノベーションを加速すると期待される。

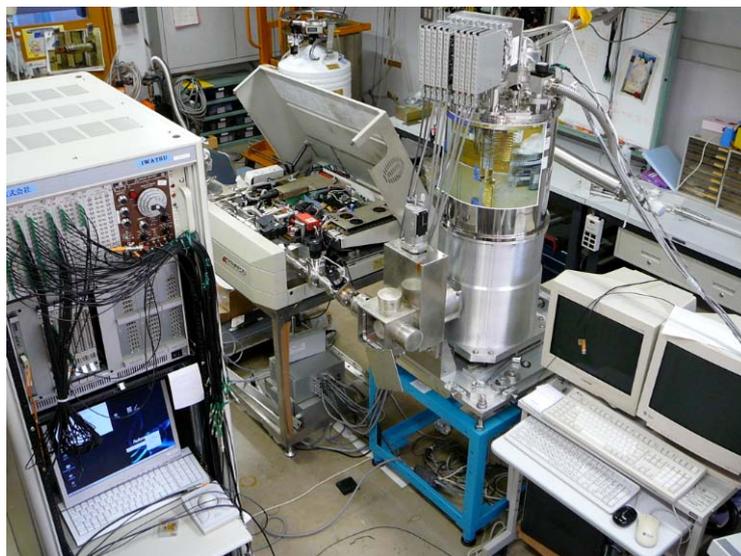


図 2 超伝導分子検出器を搭載した生体分子分析用の質量分析装置

4. まとめ

超伝導検出器に関する最新情報の詳細は、低温検出国際会議のプロシーディング等を参照されたい¹⁾⁻⁴⁾。多くの種類の超伝導検出器があり、応用フェイズへ成熟してきたと言える。ISTEC の超電導エレクトロニクス委員会で議論した結果、国際電気標準会議 (IEC/TC90 超伝導) において超伝

導検出器利用者の便宜を図るために、超電導センサーを標準化のターゲットとして取り上げることとなった。従来から日本が強いコヒーレント検出器に直接検出器を加えて、2010年シアトル IEC 全体会議の TC90 ミーティングで日本から超電導センサーアドホックグループ設立の提案を行い、各国の賛同が得られた。IEC 標準化により、超伝導検出器の普及が促進され、超伝導検出器搭載分析機器が多くの分野の計測ボトルネックを解消し、イノベーションを加速すると期待される。

参考文献：

- 1) 13th International Workshop on Low Temperature Detectors —LTD13 Stanford (California), 20–24 July 2009, AIP Conf. Proc. 1185 (2009).
- 2) M. Ohkubo, “Current status of non-equilibrium superconducting detectors for photons and molecules” AIP Conf. Proc. 1185 381 (2009).
- 3) M. Ohkubo, “Superconducting detectors for particles from atoms to proteins” Physica C 468, 1987 (2008); doi:10.1016/j.physc.2008.05.225.
- 4) M. Ohkubo, “Superconductivity for mass spectrometry,” IEICE Trans. Electron. E 90-C, 550 (2007); doi:10.1093/ietele/e90-c.3.550.

[超電導 Web21 トップページ](#)

特集：超電導エレクトロニクス-通信・検出器分野

「TES 型 X 線マイクロカロリメータで拓く宇宙観測」

宇宙航空研究開発機構
宇宙科学研究所 高エネルギー天文学研究系
教授 満田和久

「天体」と言えば星や星間ガス、そしてこれらからなる銀河を思い浮かべる方が多いであろう。しかし、これらの可視光で観測可能な天体は宇宙の普通の物質（=バリオン物質、これは宇宙の物質エネルギーのわずか4%を占めるのみで残りは正体不明の暗黒物質と暗黒エネルギーである）の存在形態の10%程度でしかない。現在の宇宙では残りの多くの普通の物質はX線を放射するような100万度から1億度の高温ガスとして広く宇宙空間に広がっていると推測されている。高温ガスの中には宇宙最初の天体ができた時代から現在までに星が作り出した重元素が含まれている。その高電離したイオンはそのイオンに特徴的な輝線を放射する。この輝線を高感度かつ高エネルギー分解能で分光観測することによって、宇宙の構造形成史や宇宙初期からの現在までの元素合成史を明らかにすることなどが可能になる。そのためには高いエネルギー分解能による観測が必要であり、TES型マイクロカロリメータは半導体検出器よりも50倍以上優れた数eVのエネルギー分解能と、アレイ化によって撮像分光を可能にする検出器として最も期待されている。

1. TES マイクロカロリメータ素子

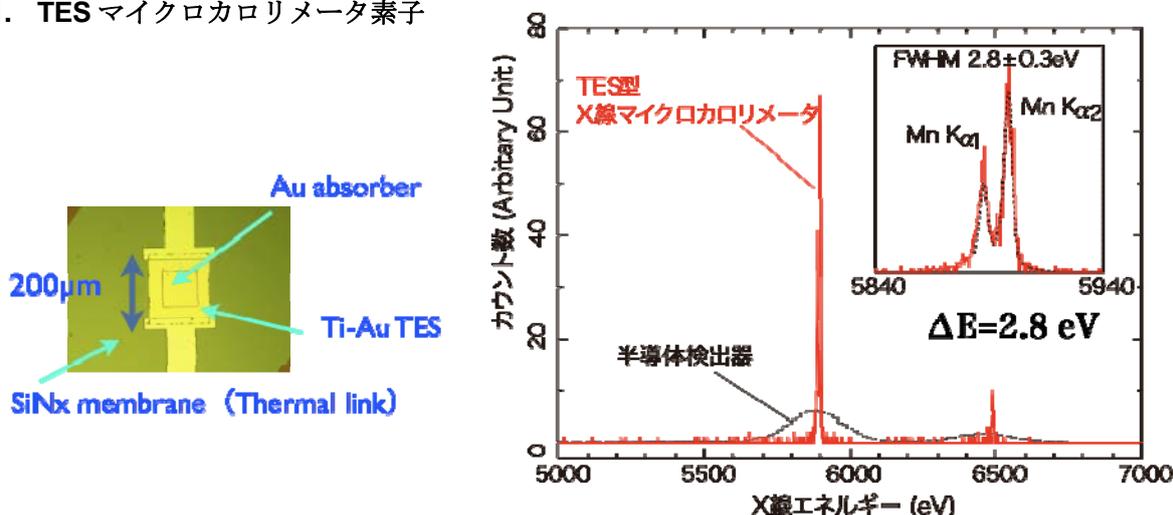


図1 我々、SASと首都大学の研究グループが開発したTES型X線マイクロカロリメータの例。写真の素子により55FeアイソトープからのMn Kα線に対して、半値幅2.8 eVの分解能が得られた。約10 eV離れたKα1とKα2線がクリアに分離されている。

我々、宇宙航空研究開発機構の満田・山崎研と首都大学の橋本・石崎研を中心とする研究グループは、将来の宇宙観測をめざしてTES型マイクロカロリメータアレイとその読み出しシステムの研究開発を行ってきた。図1に我々がインハウスで製作した素子とこの素子で得られたX線スペクトルの例を示す。この素子では、Mn Kα線（約5.9 keV）に対して半値幅2.8 eVの分解能が得られている¹⁾。この素子では、120ミクロン角・厚さ1.5ミクロンの金の薄膜がX線を吸収し、これに

よる温度上昇を金の下にあるチタンと金の2重薄膜からなる TES (Transition Edge Sensor) が検知し、X線のエネルギーを測定する。多くの物質の熱容量は室温に比べて極低温では非常に小さくなる。この素子の、金のX線吸収体と TES を合わせた熱容量は動作温度である約 100 mK においては、1 pJ/K のオーダーである。そこに 1 keV の X 線光子が一つが吸収されると 1 mK のオーダーで温度は上昇する。したがって、その温度上昇を 1 マイクロ K の精度で測定出来れば、X 線光子のエネルギーを 1 eV のオーダーで決定できることになる。温度を高い精度で測定する前に吸収された熱が逃げてしまわないように、TES は厚さ約 1 ミクロンの窒化シリコンの自立薄膜上に取り付けられている。

2. 撮像型素子と信号多重化

歴史的にはX線マイクロカロリメータの開発は温度計として半導体サーミスタを用いる半導体型マイクロカロリメータから始まった。米国の NASA ゴダード研究所のグループが開発した半導体型マイクロカロリメータでは 5.9 keV の X 線に対して 4 eV の分解能が得られており、これは我が国の X 線天文衛星 ASTRO-H に搭載される予定である。半導体型に対する TES 型の最大のメリットは、初段の読み出し回路である SQUID の周波数帯域幅の広さを活かした信号の多重化ができることにある。これによって撮像分光観測可能性がひろがる。我々は高密度に素子を並べたアレイ型の TES 型マイクロカロリメータ素子の開発も行っており、これまでに 16x16 フォーマットの 256 画素の素子で分解能 4.4 eV の分解能を得ている。しかし、この分解能は 1 画素ずつ計測回路を接続して得た結果である。

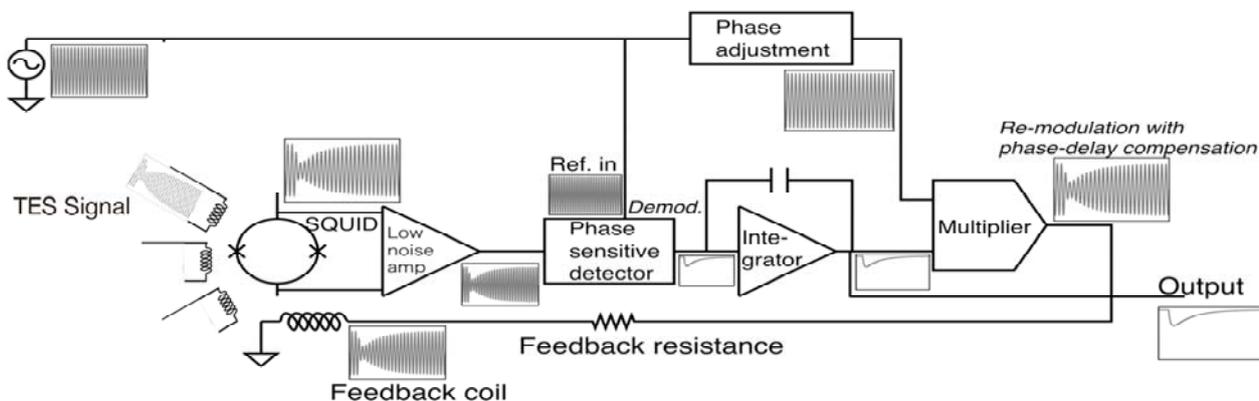


図2 我々が開発している周波数空間多重化システムの概念図。交流駆動された TES からの信号は複数の入力コイルを持つ SQUID に接続される (図は、簡単のため 3 入力であるが、8 つの入力コイルを持つ SQUID を開発した)。SQUID の信号を検波して、TES の信号を取り出し、その信号を位相を調整した搬送波で再変調して、SQUID のフィードバックコイルに戻す。これによって、5 MHz の搬送波でも SQUID を安定に動作させることができた。8 入力 SQUID と low noise amp の間には 80 段の SQUID Array Amp を用いているが、この図では省略した。

地上実験であれば、GM 冷凍機やパルスチューブ冷凍機によって 4 K で 1 W を超えるような冷凍能力が得られる。しかし地表には届かない宇宙からの X 線を観測するためには人工衛星等を用いて大気の外に出る必要がある。人工衛星上では使える電力に限り (観測装置に使えるのは数 100 W)、4 K で 20 mW 程度の冷凍能力しか得られない。このため約 100 mK で動作する TES マイクロカロリメータアレイと室温電子回路の間の配線の本数を極力減らさなければならない。このため、100 mK から 4 K の極低温ステージにおいて、複数の TES マイクロカロリメータからの信号を 1 本の信

号チャンネルに多重化して、室温ステージに送り出すことが必要となる。我々は TES マイクロカロリメータの初段増幅器として用いる SQUID の動作可能な周波数帯域幅と TES マイクロカロリメータの信号の帯域幅 (数 10 kHz) の違いに着目した周波数空間多重化を研究してきた。これは異なる画素を異なる周波数の交流で駆動し、AM 変調された信号を 1 つの SQUID に加えるという概念である。この方法で目標とする 20 画素程度の信号多重化を実現するには、5 MHz 程度の周波数で駆動する必要がある。しかし、SQUID を通常の FLL (flux locked loop) フィードバック回路で動作させると、極低温から室温への配線 (宇宙用冷凍機では 1 m 以上必要である) で発生する信号の時間遅れのために発振してしまう。そこで我々は交流信号から、元の信号を復調した後、SQUID や回路系を含めたフィードバックループで発生する遅れに相当する分だけ、位相を戻した搬送波で再度変調をかけた信号を SQUID に戻すベースバンドフィードバックによる駆動回路を開発してきた (図 2) ²⁾。駆動回路の基本的な動作と性能を実証し、現在 4 画素からの信号を多重化するシステムを開発している。

3. 将来計画

軌道上で宇宙 X 線観測を行う最初の極低温検出器は、超伝導を用いない半導体型のマイクロカロリメータになるであろう。しかし、その後の計画として、我々は TES 型マイクロカロリメータによる分光撮像観測を活発に議論している。具体的には、ミッションバリオン³⁾の検出³⁾を目的とした日本主導の小型衛星 DIOS⁴⁾、宇宙初期から現在までの元素合成史を明らかにすることを目的として欧日米で検討をすすめている 中型衛星 Origin、宇宙最初のブラックホールや最初の銀河団の形成を主要な観測目的とする米欧日の大型計画 IXO (米欧日)⁵⁾ である。小型衛星 DIOS を含めて、いずれの計画も TES 型マイクロカロリメータの研究開発をすすめている日米欧の研究機関の研究者が協力して検討を行っており、国際ミッションとして 2010 年代後半から 2020 年代初頭の実現を目指している。

参考文献：

- 1) "Impedance measurement and excess-noise behavior of a Ti/Au bilayer TES calorimeter", H. Akamatsu, Y. Abe, K. Ishikawa, Y. Ishisaki, Y. Ezoe, T. Ohashi, Y. Takei, N. Y. Yamasaki, K. Mitsuda and R. Maeda, AIP Conference Proceedings, vol. 1185, pp. 195-198 (2009)
- 2) "SQUID multiplexing using baseband feedback for space application of transition-edge sensor microcalorimeters", Y. Takei, N.Y. Yamasaki, W. Hirakoso, S. Kimura, K. Mitsuda, Superconductor Science & Technology, 22, (2009)
- 3) "Detectability of the warm/hot intergalactic medium through emission lines of OVII and OVIII", K. Yoshikawa, N.Y. Yamasaki, Y. Suto, T. Ohashi, K. Mitsuda, Y. Tawara, A. Furuzawa, Publ. Astro. Soc. Japan, 55, 879-890, (2003)
- 4) DIOS web page <http://www-x.phys.metro-u.ac.jp/dios/>
- 5) IXO web page <http://constellation.gsfc.nasa.gov/>

特集：超電導エレクトロニクス-通信・検出器分野

「STJ-X線検出器で拓く放射光計測」

独立行政法人産業技術総合研究所
志岐成友、浮辺雅宏、大久保雅隆

高エネルギー加速器研究機構
北島義典

X線吸収端微細構造 (X-ray Absorption Fine Structure: XAFS) は、元素の結合距離や電子状態を明らかにすることができるため、先端材料の分析に欠かせない手法である。省エネ半導体、セラミック、ポリマー、触媒など様々な先端材料では、B, C, N, O をはじめとする微量軽元素が機能発現に重要な役割を果たしている。微量軽元素の XAFS 分光測定には蛍光収量法が適しているが、軽元素の特性 X 線 (K α 線) は 2 keV 以下であり、この領域には母材の軽元素からの K 線や様々な元素の L, M 線があるため、微量軽元素を選別して分析を行うことは、既存のエネルギー分散分光用半導体検出器の性能では困難であった。これに加え、軟 X 線では蛍光収率が $10^{-2} \sim 10^{-3}$ と小さいため、X 線源に放射光を用いても波長分散型分光器では感度が不十分である。これらの問題を解決するために、我々は超伝導トンネル接合 (Superconducting Tunnel Junction: STJ) を搭載した XAFS 分光装置を開発している¹⁾。STJ は高計数率まで対応でき、半導体検出器より優れたエネルギー分解能、波長分散型分光器より高い感度が得られるため、元素選別能力と感度を同時に向上させることができる。

蛍光収量 XAFS 分光装置は、100 画素 STJ アレイ検出器、100ch プリアンプ、FPGA を用いた 100ch DSP 波高分析装置、電力の投入で 0.3 K まで冷却できる寒剤フリー³He クライオスタット、分析真空チャンバー、試料交換用ロードロックを組み合わせたものである (図 1)。現在、KEK PF BL-11A にて動作試験を行っている。目標性能は、立体角 10^{-3} sr、エネルギー分解能 10 eV、光子計数率 1 M cps である。

現状では、自動冷却、100ch 分の DSP パルス波高スペクトル取得、ビームラインのモノクロメーターと連動した XAFS スペクトル取得が可能になった段階である。³He クライオスタットの到達温度は 0.320 K、室温から最低温度までの所要時間は約 40 時間、保持時間は 60 時間以上である。再冷却は数時間で可能である。冷凍機の特徴は、空冷式コンプレッサーと無冷媒パルスチューブ冷凍機を組み合わせているため寒材や冷却水を必要としないことと、自動冷却が可能であることである。検出器の構造は、単色光に対して単一のピークを示すよう上部電極を厚くするなど、特に軟 X 線に



図 1 超伝導検出器を搭載した軽元素用蛍光収量 XAFS 分光装置

図 1 超伝導検出器を搭載した軽元素用蛍光収量 XAFS 分光装置

適した構造を採用している²⁾。アレイ検出器は、100画素のうち90画素程度の素子が使用可能な低リーク電流を達成している。現在、16画素を同時に動作させている。酸素 K α 線 (525 eV) に対するエネルギー分解能実測値は 14~22 eV (FWHM) で、全 16 画素において半導体検出器 (Silicon Drift Detector: SDD) の限界より 2~3 倍優れた性能を達成している (図 2)。2010 年度中には、現在不足しているプリアンプを整備し、100 ch 動作を達成する見込みである。

多チャンネル化により、スループットが向上する。例えば、 α -Al₂O₃ の酸素 K 吸収端 XAFS スペクトル測定に必要な時間は、1 画素では約 6 時間で、回折格子を用いた波長分散型分光器と同程度である。16 画素を同時に用いると、30 分程度で同じ統計精度のスペクトルを得ることができ、波長分散型分光器に比べ極めて高い感度が得られる。

装置の開発と並行して、ユーザーから提供されるサンプルの測定を試行している。来年度から広く公開する予定である。

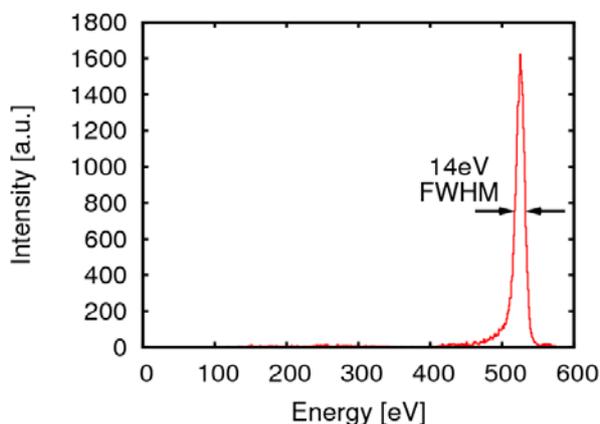


図 2 STJ 検出器に 525 eV 酸素 K α 線を照射したときのパルス波高スペクトル

謝辞

本研究は、原子力委員会の評価に基づき、文部科学省原子力試験研究費により実施されたものである。

参考文献

- 1) S. Shiki, N. Zen, M. Ukibe, M. Ohkubo, AIP Conf. Proc. 1185 (2009) 409.
- 2) M. Ukibe, S. Shiki, Y. Kitajima, M. Ohkubo, X-Ray Spectrometry, submitted.

特集：超電導エレクトロニクス-通信・検出器分野

「STJ-分子検出器による質量分析」

独立行政法人産業技術総合研究所

計測フロンティア研究部門 超分光システム開発研究グループ

大久保雅隆、浮辺雅宏、志岐成友、鈴木宏治、千葉かおり、北爪達也

1. はじめに

質量分析法 (MS) は、環境、ライフサイエンスなど幅広い分野において、最も重要な分析法の 1 つである。質量分析では、イオン化された原子や分子を、数 keV に加速し、イオンの質量電荷数比 (m/z) に応じて、空間的あるいは時間的に分離して分子の同定などが行われる。生体高分子を壊すことなくイオン化するレーザーソフトイオン化法の発明とエレクトロスプレーイオン化の発明で、田中耕一氏とフェン氏がノーベル賞を受賞したことは記憶に新しい。近年では、レーザーソフトイオン化を発展させたマトリクス支援レーザー脱離イオン化 (Matrix Assisted Laser Desorption Ionization; MALDI) が広く普及している。MS では、従来、数分子量~5,000 以下の低分子量分子しか分析できなかったが、これらのイオン化法の出現で、分子量数 100,000 以上のタンパク質まで適用できるようになり、ライフサイエンスへの応用が急速に広まった。

しかしながら、MS には原理上 2 つの限界がある。その 1 つは、MS で決定できる物理量は m/z であって、質量ではないということである。質量分析はその名前とは裏腹に、質量を一意に決定できない。これは、イオンの電磁気力に対する応答が m/z で決まるため、常に z 値の不確かさがあるということである。例えば、 $^{14}\text{N}^+$ と $^{14}\text{N}_2^{2+}$ は $m/z=14$ であり如何に高質量分解能な装置を用いても、原理的に分離することができない。ほんの僅か質量が異なる Si についても、 Si^{2+} と N^+ を分離することは容易ではない。MS のもう一つの原理的限界は、電磁気力を使った分離であるためイオンしか分析できないことである。異なる中性分子を見分けることはできない。この限界は、タンデム質量分析 (MS/MS) を用いた、イオン反応や分子構造解析の手法において、“中性損失: Neutral loss” と呼ばれている。MS/MS は、複数の分子が混在した試料をイオン化して、一段目の MS で親イオンを選択し、そのイオンを原子衝突や電子捕獲により不安定な状態にして装置内で解離させ、2 段目の MS でフラグメントを分析し、分子の同定や分子構造を解析する手法である。

2. 超伝導分子検出器による質量分析の限界の突破

MS の中でも分子の飛行時間で m/z に応じて分離するタイプは、飛行時間型質量分析 (Time-of-flight MS: TOF MS) と呼ばれる。MS で使用される分子検出器は、マイクロチャンネルプレート (MCP) や二次電子増倍管が用いられている¹⁾。これらの検出器では、分子が物質表面に衝突したときに放出される二次電子を増倍することにより、電気信号として分子の到来を検出できる。検出感度は二次電子の放出効率 (量子効率) で決まるが、数 keV のイオン 1 個の衝突に対して放出される二次電子の個数は高々数個であり、タンパク質程度の分子量になると、量子効率はゼロに近くなる。従って、従来の検出器では、高分子量域では数え落としが発生することに加えて、分子あるいは原子が到来したことが分かるだけである。このような測定はイオンカウンティングモードと呼ばれる。多量の分子が一度に検出器に入射する場合には電流値を測定することが行われるが、本稿ではそれには言及しない。しかしながら、数え落としがあっても、MS の検出感度は総合的に他の分光学的な検出方法を大きく上回ることができる。

MS 装置のイオン源、分離、検出といったコンポーネントには、イオンの価数である z 値を測定できる要素は見当たらない。このため、MS で測定できるのは m/z となる。この限界を克服するにはどうしたらよいであろうか？ 分子はイオン源で電荷を付与された後、一定の電位差で加速される。このとき、イオンは、 $z \times e$ の運動エネルギーを得る。したがって、分離の到来時刻に加えてイオンの

運動エネルギーが測定できれば、 m/z と z 値が独立に分かり m を一意に決定できる真の質量分析が可能になる。そのような検出器はないであろうか？

超伝導を使えば数 keV の粒子 1 個の運動エネルギー測定を実現できる。1999 年までの超伝導検出器の質量分析への応用が文献 2 にまとめられている。しかし、この時点で MS の原理的限界を克服したという報告はない。図 1 に従来の分子検出と超伝導分子検出のメカニズムの比較を示す²⁾。高エネルギーの α 線が物質内部深くまで侵入し、容易にキャリアを励起できるのに対して、数 keV の分子や原子は、極表面層で止まるか表面に付着するだけである。このような場合に使われるのが、二次電子放出であり、従来型検出器の分子検出メカニズムであるのは前述の通りである。一方、超伝導体はフォノンに感度があることが知られている。超伝導体のエネルギーギャップは、デバイエネルギー（フォノンの最大エネルギー）より小さく、フォノンでクーパー対が壊れる。したがって、超伝導体表面で停止するような高分子のソフト衝突であっても、分子衝突で生成されるフォノンを介して分子を検出できるし、壊れたクーパー対の量から超伝導体に付与されたエネルギー（即ち、分子のもっていた運動エネルギー）を知ることができる。従来型分子検出器では、二次電子の数が高々数個であるのに対して、クーパー対が壊れて生成される準粒子の数は、大まかには運動エネルギーを超伝導エネルギーギャップで割った数となり 10^6 個と非常に多くなる。超伝導分子検出器では、二次電子増倍管の最終出力電荷量と同じ量を増幅なしに得られる。このことは、運動エネルギー測定が可能になることに加えて、超伝導検出器に分子が入射したら、数え落とし無く 100% の効率で分子を検出できることを意味する。原理的には、分子量 10,000,000 以上まで検出感度の低下は発生しない。

クーパー対が壊れて生成された準粒子を読み出すには、トンネル接合を使う。準粒子の熱的励起がないように、0.3 K まで冷却後に、接合と並行に数 10 G の磁場を印加して DC ジョセフソン効果を抑制した状態で、サブギャップ領域にバイアスする。この状態で接合電極表面に分子が衝突すると、フォノンを介して準粒子が生成され、トンネル電流が増加し、準粒子寿命に応じて元の状態に戻る。従って、分子 1 個が衝突したときに、接合の構造にも依るが立ち下がり時間 1-3 μ s の電流パルスが出力される。この電流パルスの後段の半導体アンプ等で読み出すためには、トンネル接合の品質は、ジョセフソン効果を応用する際に必要とされる品質より、格段に高い必要がある。リーク電流は従来より 3 桁低い必要がある。さらに、検出器応用では十分な数の分子が当たるように広い有感面積が重要であり、3 桁低いリーク電流を、数 100 μ m の接合面積と 100 素子規模のアレイで実現する必要がある。この品質を得るために、我々は、トンネル接合の層構造、膜膜堆積条件、エッチングプロセスの最適化、マスクデザインの調整を行った。

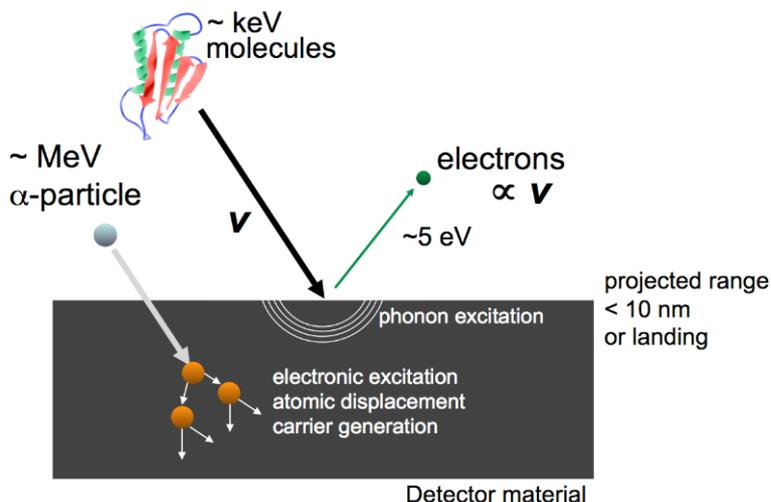


図 1 従来の分子検出と超伝導検出の比較。参考のために、高エネルギー粒子である α 線（ヘリウムの原子核）が入射した場合も示している²⁾。

財団法人 国際超電導産業技術研究センター 〒135-0062 東京都江東区東雲 1-10-13 Tel: 03-3536-7283 Fax: 03-3536-7318

質量分析における測定は、MALDI がイオン源の場合、レーザートリガーと電流パルスの時間差から m/z が、パルス波高値から z を得ることで行われる。図2に酵素であるリゾチームの測定例を示す。横軸 m/z 、縦軸運動エネルギーで、分子1個ずつ測定値の位置にドットがプロットされている（スキッタープロットと呼ぶ）。前述した、超伝導分子検出器を用いて、運動エネルギーの測定を行い N^+ と N_2^{2+} を初めて分離したデータは、文献5に報告されている。この実験は、米国化学会のオンラインニュースでも取り上げられた⁶⁾。

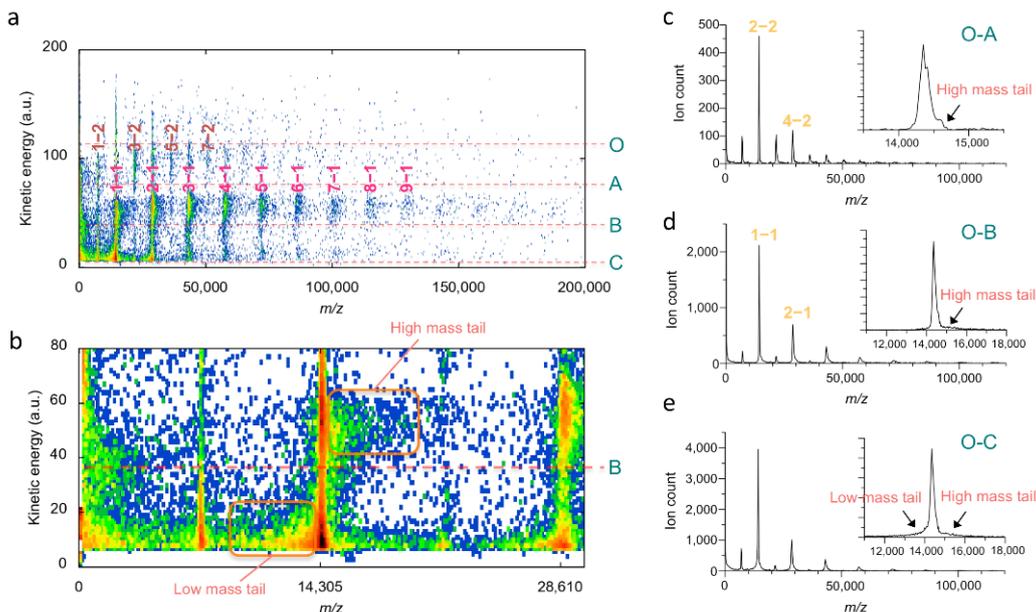


図2 超伝導分子検出器搭載質量分析装置によるリゾチームの測定例。生体分子には、イオン化されて飛行中に壊れる現象（ポストソースディケイと呼ばれる）がある。PSDによって壊れたフラグメントは、TOFは元のイオンと同じであるが、運動エネルギーはフラグメントの分子量に比例するため、bに示すようにある m/z の付近に縦にイベントが見られる。しかし、大部分のイオンは元のまま検出され、例えば O-A の間のイベントのみ取り出すと、2価イオンのみの質量スペクトルを得ることができる⁴⁾。

MS/MSにおける中性損失の問題も、超伝導検出器で解決することができる。中性損失の問題は、電子捕獲解離において生じる。例えば、イオン価ポテンシャルが低い1価イオンに、電子を捕獲させると励起状態の中性分子が生成される。励起状態の中性分子が解離して生成されたフラグメントは、全て中性である。このため、このような解離反応を直接測定するのは困難であった。ここで、解離する励起状態の中性分子の運動エネルギーが保存されることに注目すると、解決の糸口が見えてくる。元の運動エネルギーは、中性フラグメントの質量に応じて分配されるため、運動エネルギーを

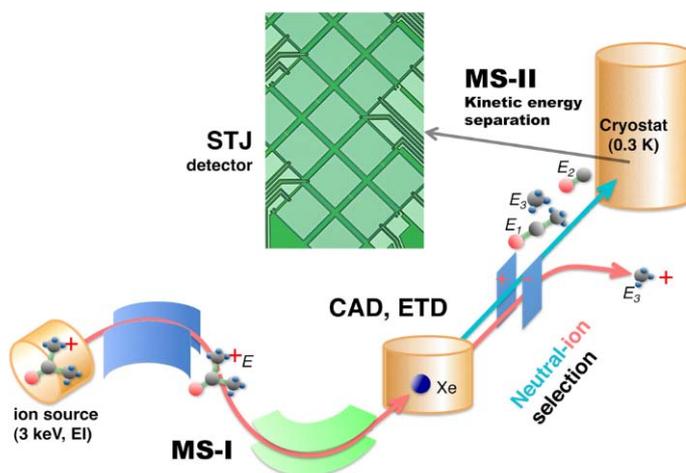


図3 中性損失 (Neutral loss) の問題を解決した超伝導分子検出器搭載質量分析装置の構成⁷⁾

測定できれば、異なる中性フラグメントを分離できる。この分析手法の正当性は、二重収束質量分析計を1段目のMSにし、希ガスから電子を捕獲して解離した中性フラグメント分子の運動エネルギー測定で2段目MSを行う実験で確かめられた(図3)⁷⁾。

以上のように、超伝導分子検出器によって、従来のMSの限界を克服することが可能である。しかしながら、その応答速度は、準粒子寿命で制限され μs のオーダーである。これは、TOFの測定時間の精度を制限し、 μs の間は次の分子を検出できないことを意味する。近年、これらの問題を解決する超伝導ナノストリップ分子検出器が開発された⁸⁾。従来赤外域の単一光子検出のために、数 $10\mu\text{m}$ 角の領域に数 nm 厚で幅数 100nm のNbN超伝導ナノストリップを配置したSuperconducting Single Photon Detector (SSPD)が使われていた。この検出器では、 1ns を上回る時間分解能を達成できる。しかしながら、数 $10\mu\text{m}$ の素子サイズでは分子がほとんど当たらないため、質量分析はできなかった。この問題を、並列配置という素子設計を取り入れ、現在では、 1mm の素子サイズでも、 1ns を上回る時間分解能が達成されている⁹⁾⁻¹¹⁾。近年、このタイプの超伝導ナノストリップ検出器では、赤外域の光子、生体分子に加えて、ナノ粒子¹²⁾、プラズモン¹³⁾、電子¹⁴⁾、の検出に発展している。

3. まとめ

質量分析装置に超伝導分子検出器を搭載する際の難しさは、少なくとも 1mm 以上の検出器サイズにおいて、 1nm 厚のトンネル障壁の完璧さや、 $1\mu\text{m}$ 幅以下のナノ構造の均一性が求められることである。近年のナノファブリケーションの進歩により、これらのナノ構造を有する構造をマクロなサイズに渡って均一に作製することが実現可能になってきた。超伝導を使った分子の検出には、冷凍技術の進歩も追い風となっている。超伝導分子検出器の動作には、 $0.3\text{K}-4\text{K}$ の極低温環境が必要であるが、機械式冷凍機を使った自動制御のクライオスタットを用いることができる。質量分析装置のユーザーは極低温への冷却に液体ヘリウムの扱いに対する知識がなくても、超伝導の高いパフォーマンスを活用することができる。

参考文献：

- 1) 田中耕一、吉野健一、林雅宏、内藤康秀、大久保雅隆、"マトリクス支援レーザー脱離イオン化飛行時間型質量分析計用の検出器," J. Mass Spectrom. Soc. Jpn. 58, 111 (2010).
- 2) M. Ohkubo, "Superconducting detectors for particles from atoms to proteins," Physica C 468, 1987 (2008).
- 3) M. Frank, S. Labov, G. Westmacott, and W. Benner, "Energy-sensitive cryogenic detectors for high-mass biomolecule mass spectrometry," Mass Spectrom. Rev. 18, 155 (1999).
- 4) K. Suzuki, M. Ohkubo, M. Ukibe, K. Chiba-Kamoshida, S. Shiki, S. Miki, and Z. Wang, "Charge-state-derivation ion detections using a superconducting nanos structure device for mass spectrometry," Rapid Commun. Mass Spectrom. 24, 3290 (2010).
- 5) S. Shiki, M. Ukibe, Y. Sato, S. Tomita, S. Hayakawa, and M. Ohkubo, "Kinetic-energy-sensitive mass spectrometry for separation of different ions with the same m/z value," J. Mass Spectrom. 43, 1686 (2008).
- 6) <http://pubs.acs.org/action/showStoryContent?doi=10.1021%2Fon.2008.11.13.163784>.
- 7) M. Ohkubo, S. Shiki, M. Ukibe, S. Tomita, S. Hayakawa, "Direct mass analysis of neutral molecules by superconductivity," Int. J. Mass Spectrom. 299, 94 (2011).
- 8) K. Suzuki, S. Miki, S. Shiki, Z. Wang, M. Ohkubo, "Time resolution improvement of superconducting NbN stripline detectors for time-of-flight mass spectrometry," Appl. Phys. Express 1, 031702 (2008).
- 9) A. Casaburi, N. Zen, K. Suzuki, M. Ejmaes, S. Pagano, R. Cristiano, M. Ohkubo, "Subnanosecond time response of large-area superconducting stripline detectors for keV molecular ions," Appl. Phys. Lett. 94, 212502 (2009).
- 10) N. Zen, A. Casaburi, S. Shiki, K. Suzuki, M. Ejmaes, R. Cristiano, M. Ohkubo, "1-mm ultrafast superconducting stripline molecule detector," Appl. Phys. Lett. 95, 172508, (2009).

- 11) A. Casaburi, M. Ejmaes, N. Zen, M. Ohkubo, S. Pagano, and R. Cristiano, "Thicker, more efficient superconducting strip-line detectors for high throughput macromolecules analysis," Appl. Phys. Lett. 98, 023702 (2011).
- 12) M. Marksteiner, *et al.*, "A superconducting NbN detector for neutral nanoparticles," Nanotechnology 20, 455501 (2009).
- 13) R. Heeres, S. Dorenbos, B. Koene, G. Solomon, L. Kouwenhoven, V. Zwiller, "On-chip single plasmon detection," Nano Lett. 10, 661 (2010).
- 14) M. Rosticher, *et al.*, "A high efficiency superconducting nanowire single electron detector," Appl. Phys. Lett. 97, 183106 (2010).

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導関連 2-3月の催し物案内

3/6-8

International Workshop on Novel Superconductors and Super Materials 2011 (NS2 2011)

場所：東京工業大学

主催：東京工業大学、科学技術振興機構他

問合せ：<http://www.supera.titech.ac.jp/ns22011/index.html>

3/10

第77回超伝導科学技術研究会ワークショップ「極限を測る超伝導技術の最前線」

場所：東京大学 本郷キャンパス

主催：未踏科学技術協会 超伝導科学技術研究会

問合せ：<http://www.sntt.or.jp/~fsst/20110310.html>

3/11

先端的極低温冷却技術調査研究会

場所：高エネルギー加速器研究機構 研究本館 1階 会議室 1

主催：低温工学協会

問合せ：http://www.csj.or.jp/survey/2011/cryogenic_0311.pdf

3/16-18

平成23年 電気学会全国大会

場所：大阪大学

主催：電気学会

問合せ：<http://www2.iee.or.jp/ver2/honbu/03-conference/index.html>

3/24-27

2011年春季 第58回 応用物理学関係連合講演会

場所：神奈川工科大学

主催：応用物理学会

問合せ：<http://www.jsap.or.jp/activities/annualmeetings/index.html>

3/25-28

日本物理学会 第66回年次大会

場所：新潟大学

主催：日本物理学会

問合せ：<http://wwwsoc.nii.ac.jp/jps/jps/bbs/meetings.html>

3/25-27

日本金属学会 2011年春期（第148回）大会

場所：東京都市大学

主催：日本金属学会

問合せ：http://www.sendai.kopas.co.jp/METAL/MEETINGS/2011_spr/2011-spr02.html

3/28-4/1

2011 Particle Accelerator Conference (PAC'11)

場所 : the New York Marriott Marquis Hotel located in New York City

問合せ : <http://www.bnl.gov/pac11/>

(編集局)



[超電導 Web21 トップページ](#)

新聞ヘッドライン (12/17-1/17)

- 今年の十大研究成果 首位は米大の量子装置 米サイエンス誌が選出 日刊工業新聞 12/17
- レアアース 消えない火種 一部関税引き上げ 日米欧と神経戦 Fuji Sankei Business i. 12/17
- 米レアアース鉱山 注目 年内にも再開 日本へ輸出意欲 読売新聞 12/18
- 中国レアアース 輸出枠近く公表 来年分も減少見通し 朝日新聞 12/19
- 太陽光発電を追う 太陽熱 独企業、北アフリカに施設 先駆けた日本は脱落 朝日新聞 12/19
- 国際標準 築けるか 日本式WV充電 普及急ぐ 携帯で苦い経験 日中連携も模索 朝日新聞 12/21
- リニア営業車両の発注先 三菱重工と日本車両製造 JR 東海 日刊工業新聞 12/22
- レアアース在庫半減 国内 10 月末 中国が輸出制限 中小の確保懸念 日本経済新聞 12/22
- 物材機構 演算と記憶の複合素子を開発 消費電力 100 万分の 1 日刊工業新聞 12/24
- 新原理のトランジスタ 電流使わず情報処理 日立など 超省エネに道 日本経済新聞 12/24
- レアアース輸出制限 米、WTO で中国提訴も USTR 報告書「大きな懸念生んだ」 日本経済新聞 夕刊 12/24
- 蛍光体、レアアース不要 愛媛大、バックライト用代替材 3 原色すべて対応 日経産業新聞 12/24
- トランジスタ 電子のスピン使い試作 日立など国際チーム 省エネ素子に道 日本経済新聞 12/24
- 北米、レアアースに沸く 中国の輸出制限 開発の好機 休止鉱山が復活 日本から照会相次ぐ 埋蔵豊富 外交上も重要 朝日新聞 12/26
- エコカー向け磁石 レアアース使用 4 割削減に成功 東北大など 日本経済新聞 12/27
- 超電導線 電気自動車への対応期待 日本経済新聞 夕刊 12/27
- 日立「医療」3 強の背中遠く GE などと主力機器で大差 診断装置大手 買収でも・・・ 新興国開拓や製品開発 グループ連携で対抗 日経産業新聞 12/27
- 次世代送電網、仏での実証事業 NEDO、東芝に委託 日経産業新聞 12/27
- 海技研 洋上風力用の実験公開 揺れの制御、模型で再現 電気新聞 12/27
- フジクラ 11 年の事業方針 収益率重視の経営へ グローバル展開も加速 電気新聞 12/27
- 原子力関連 3.7%減 ITER は 15%増に 電気新聞 12/27
- ABB 北米で送電プロ受注 30 万 V 海底ケーブルを敷設 電気新聞 12/28
- 次世代送配電 WG1 双方向通信巡り議論 インフラ整備、標準化など 電気新聞 12/28
- ネオジウム磁石 ジスプロシウム 4 割減 インターメタリックなど 保持力は維持 日刊工業新聞 12/28
- 中国レアアース 11 月の輸出半減 朝日新聞 12/28
- 東京電力社長 清水正孝氏 インフラ輸出、どう稼ぐ? 火力や送電網にも注力 日本経済新聞 12/28
- 国際標準で連携組織 パナソニック・日立・東芝・産総研など 初の”オールジャパン” 日刊工業新聞 12/29
- 実績評価 日立正式受注へ 英高速鉄道 納入車両「ノートラブル」 Fuji Sankei Business i. 12/29
- レアアース 中国、輸出枠 35%削減 来年前半 調達一段と難しく 日本経済新聞 12/29
- 中国レアアース 輸出枠 35%減へ 11 年上半期 日本企業「厳しい」 「想定範囲内」大畠経産相 朝日新聞 12/29
- レアアース輸出枠 35%減 来年上半期 中国 生産管理を強化 読売新聞 12/29
- 米 EV、日本充電器採用 走行実験 国際標準へ一歩 読売新聞 12/29

- 「レアメタル」初の人工合成 周期表両隣の元素から パラジウム似の新合金 読売新聞 12/30
- 中国がレアアース団体 来年発足 価格交渉で主導権狙う Fuji Sankei Business i. 12/30
- 南鳥島近海で資源調査 政府 レアメタル分布把握 中韓との採掘競争に備え 日本経済新聞 1/03
- 広島大・芝浦工大、軟骨治療向け磁石開発へ 高温超電導で 日本経済新聞 1/04
- 高温超電導 応用広がる 軟骨治療向け磁石開発へ 広島大・芝浦工大 日経産業新聞 1/04
- 家庭向けに送電実験 住友電工など、50万世帯分 日経産業新聞 1/04
- 材料の研究体制強化 岡山大、「有機」「金属」など 日経産業新聞 1/04
- リニアの中間駅沿線県に提案へ JR 東海 朝日新聞 1/05
- 中国、レアアース団体設立へ 輸出価格交渉の窓口に 朝日新聞 1/05
- 地域経済産業審議官 内山氏（関東経産局長）が就任 日刊工業新聞 1/05
- 官民で狙う「アジア標準」日本版 GPS インフラ輸出後押し 事業費 2000 億円 PFI で確保 読売新聞 1/05
- リニア全線開業 前倒し示唆 JR 東海社長 工事費圧縮などで実現 読売新聞 1/05
- 鉄道や医療・・・日本の技術・規格 国際標準化へ官民連携 政府が新組織 日本経済新聞 1/05
- スキルミオン結晶の作製 東大など、室温で実現 次世代磁気メモリーに道 日刊工業新聞 1/06
- 実用化・普及が期待される主な環境エネルギー技術 超伝導高効率送電 朝日新聞夕刊 1/06
- 露最大のガス田開発 三井・三菱が参加検討 読売新聞 1/07
- 海底レアメタル採掘へ 沖縄・小笠原に深海ロボ 今年から試験 読売新聞 1/07
- 断路器部品の脱落原因？ 電圧低下 中部電力が中間報告 日本経済新聞 1/08
- 次世代送電網に費用の壁 米、料金選択制で普及狙う 日本経済新聞 1/09
- 米グリーン・ニューディール 波力発電来年稼働 「光合成燃料」も実現 読売新聞 1/09
- 北米で風力発電 三菱商事、事業費 400 億円 日本経済新聞 1/10
- 「革新電池」実用化へ一歩 電気自動車向け電池開発日本の実力 容量大きくコスト低減 日本経済新聞 1/10
- バリウム原子の振動確認 「がらがら」形状の化合物 熱電性能向上に道 東北大広島大 日刊工業新聞 1/11
- 太陽光 大量導入に備え 東京電力技術開発研究所 日経産業新聞 1/11
- 新時代の国際標準化 システム全体の構図描く スピード勝負で存在感 日刊工業新聞 1/13
- 脈打つ流れ 血流ヒント抵抗減らす 読売新聞夕刊 1/13
- 脱レアアースモーター 来年度、実用化にめど 大阪府大ダイキン 日刊工業新聞 1/14
- レアアース確保 日米協議 6月にも 読売新聞 1/14
- 鉄系高温超伝導体で軌道起源型発見機構 新潟大が実証「従来型と相違」 科学新聞 1/14
- 脳測定、子供も正確に 横河電機 体動かしても補正 日経産業新聞 1/18
- 医療・介護最前線レポート 中之島クリニック（大阪市） サービス改善へ覆面調査 日経産業新聞 1/14
- 科技関係の政府予算案 2.1%増の 3.6 兆円 日経産業新聞 1/14
- 日本のエネルギー需要 核融合、加速器開発から放射性廃棄物処分まで 世界的に見てもユニークな機関 科学新聞 1/14
- 経産省 眠った技術実用化支援 試作ラインに補助 日経産業新聞 1/17

(編集局)

[超電導 Web21 トップページ](#)

超電導速報—世界の動き (12月)

財団法人国際超電導産業技術研究センター
国際部
部長 津田井昭彦

電力

Bruker Energy and Supercon Technologies, Inc. (2010年12月1日)

Bruker Advanced Supercon GmbH、Bruker HTS GmbH (両社とも Bruker Energy & Supercon Technologies, Inc.[BEST]の子会社)、AREVA Energietechnik GmbH (Schneider Electric/Alstom Gridの子会社)及び Stadtwerke Augsburg Energie GmbH は、ドイツ連邦政府経済技術省により、ドイツ Augsburg の電力グリッドにおける新しいシールドタイプの誘導型超電導限流器の開発、実証試験のための予算が認められたと発表した。2010年10月に始まったこのプロジェクトは、総予算770万ユーロ(約1,000万米ドル)で、内50%は経済技術省の資金により賄われる。このプロジェクトで実証試験が行われるシールドタイプ中容量限流器は、BEST社のY系線材と同社の超電導機器に関するノウハウを使い、同時に、Schneider Electric/Alstom社の電力グリッド用変圧器設計の経験や送配電市場に関する深い知識も活用される。この限流器の機能モデルの試験は既に成功しており、その結果は2009年11月に公表されている。今回のプロジェクトでは、最初の2年間にフルスケール3相限流器の開発、製造を行う予定である。この限流器を使って、各種電力関係の試験を行い、その後技術実証を目的とした9カ月のフィールド試験を実施する。BEST社の事業開発担当役員 Hans-Udo Klein は次のように述べた。「我々は、この超電導限流器が配電用途に向けた高性能、高信頼性、高耐久性に関する電力事業者の要求事項を満足させるものであると考えている。この超電導限流器は、高速応答で、事故時の配電網の保護機能や外部トリガーとかサービス・コール不要の速やかな復旧という機能を持つ真のスマート・グリッド装置としてのポテンシャルを有するものである。」

(出典)

“Bruker Energy & Supercon Technologies (BEST), Schneider Electric/Alstom Grid and Stadtwerke Augsburg Announce BMWi Grant for iSFCL Joint Demonstration Project”

Bruker Energy and Supercon Technologies, Inc. press release (December 1, 2010)

<http://www.bruker-est.com/pr101201.html>

American Superconductor Corporation (2010年12月20日)

American Superconductor Corporation (AMSC) は、オーストラリアの Ergon Energy Corporation Limited からターンキー方式による D-VARS TATCOM 無効電力補償システムを受注した。この D-VARS TATCOM システムは、地域の電力品質改善を目的として、Queensland 変電所に設置される予定。このシステムは、電力グリッドを常時監視し、必要な場合は自動的かつ瞬時に電圧を安定させ、既存の電力線を通してより大きな電力をより信頼性高く、高効率に伝送することを可能とする。システムは、容量性無効電力 20MVA、誘導性無効電力 5MVA を連続して補償できる能力を持つ。AMSC社は、システムの製造・販売の他、システムの据え付け、維持管理及びその他の支援サービスも提供している。受注したシステムは2012年早期に運転開始予定である。

(出典)

“Ergon to Utilize Advanced D-VARR STATCOM Intelligent Grid Solutions”
American Superconductor Corporation press release (December 20, 2010)
<http://www.amsc.com/>

NMR 及び分光計

Bruker Corporation (2010年12月13日)

Bruker Corporation は、オランダ University of Utrecht から 527-GHz ジャイロトロンを組み込んだ新型の固体素子型動的核分極(DNP)・NMR システムを受注した。この新しい装置は、従来の動的核分極(DNP)・NMR システムの倍の印加磁場により、固体素子型 NMR としては最高の感度を実現し、生体物質構造や細胞膜蛋白質の研究に新たな分野を切り開くものである。18.8 T (NMR 周波数としては 800 MHz) の超電導マグネットは 89-mm の広いボア径を有しており、この装置の心臓部である。この装置の購入資金は、Dutch Science Foundation (NWO) と University of Utrecht から折半で提供される。

(出典)

“Bruker Receives Order from the University of Utrecht for a Novel 527 GHz Solid State DNP-NMR System for Research on Membrane Proteins and Protein Complexes”
Bruker Corporation press release (December 13, 2010)
<http://www.bruker-biospin.com/index.php?id=4287>

Bruker Corporation (2010年12月15日)

Bruker Corporation は、University of British Columbia から超強磁場 AVANCE850 分光計を受注した。この 850-MHz NMR 超電導マグネットと分光計は、細菌感染症のメカニズムの研究に使用される。装置の購入資金は、Canada Foundation for Innovation, British Columbia Knowledge Development Fund 及び University of British Columbia から提供される。

(出典)

“University of British Columbia Orders Canada’s First Compact 850 MHz NMR System from Bruker to Enable Research on Microbial Diseases”
Bruker Corporation press release (December 15, 2010)
<http://www.bruker-biospin.com/index.php?id=4291>

(注) 詳細は、<http://www.bruker-biospin.com/pr231009.html>参照。

加速器

European Spallation Source AB (2010年12月13日)

European Spallation Source (ESS) 及びフランスの研究機関 CEA (Commissariat à l’Energie Atomique et aux Energies Alternatives) と CNRS (Centre National de la Recherche Scientifique) は、ESS の装置設計の改善に向けた共同研究に着手した。この研究は、2012年に完了する予定。本件に係る研究契約は、超電導キャビティー等の加速器主要コンポーネントに不可欠な研究の他、粒子源用装置開発、研究者の交流を網羅したものとなっている。12月9日、ESS は CERN との間で、キー研究者の交流、プロジェクト管理手法に関する共同研究契約及び CERN の極低温モジュールシ

STEM試験施設の利用に関する契約を締結した。

(出典)

“European Spallation Source AB: France Confirms Its Support for ESS with the Signing of MoUs in Stockholm”

European Spallation Source press release (December 13, 2010)

<http://www.cisionwire.com/european-spallation-source-ab/france-confirms-its-support-for-ess-with-the-signing-of-mous-in-stockholm66254>

基礎

Ruhr-Universität Bochum 及び Christian-Albrechts-Universität zu Kiel (2010年12月1日)

ドイツの Researchers at Ruhr-Universität Bochum (RUB)、Christian-Albrechts-Universität zu Kiel (CAU)、また、米国の University of Santa Barbara は、世界で初めて平行スピンを持つクーパー対の存在を実験的に証明した。このクーパー対は、合成スピン 1 の値を持つ。角運動量は空間で 3 つの方向の自由度を持ちうるが、この合成スピン 1 の状態は 3 重項状態として知られている。3 重項状態のクーパー対の比率はわずかであり、しかもこの 3 重項クーパー対は速やかに 1 重項状態へと変化していく。この 3 重項クーパー対の存在を実験的に証明するため、研究グループは SQUID のトンネル・バリアー層を強磁性層に置き換え、強磁性層を通過することにより 1 重項クーパー対を破壊して、超電導層からバリアー層を介した対極への通過を阻止するような仕組みを作り出した。このような仕組みにより 1 重項クーパー対によるトンネル電流は大幅に減少する。しかしながら、3 重項クーパー対はこのような磁性障壁をずっと容易に通過することができる。もし、1 重項クーパー対の一部が磁性層通過時に 3 重項クーパー対に変化するのであれば、トンネル電流は大幅に増加することになるであろう。このような実験手法を使い、研究グループは 3 重項クーパー対の存在を証明することに成功した。また、同時に、3 重項クーパー対が磁性障壁通過するトンネル電流は 1 重項クーパー対が従来の絶縁体障壁を通過するトンネル電流よりも大きくなることを実証した。この実験以前は、3 重項クーパー対の存在は理論的に予測されているだけであった。研究グループの結果は、American Physical Society のジャーナルに掲載された。

(出典)

“Electron Pairing; Triplet superconductivity proven experientially for first time; Tracking down Cooper pairs: RUB researchers confirm theoretical hypothesis”

Ruhr-Universität Bochum press release (December 1, 2010)

<http://aktuell.ruhr-uni-bochum.de/pm2010/pm00405.html.de>

“Electron Pairing; Triplet superconductivity proven experientially for first time”

Christian-Albrechts-Universität zu Kiel press release (December 1, 2010)

<http://www.uni-kiel.de/aktuell/pm/2010/2010-176-cooper-paare-e.shtml>

Rice University (2010年12月13日)

Rice University の研究者は、ドイツの Max Planck Institute for Chemical Physics of Solids (MPI-CPFS) や他の研究機関と協力して、従来型ではない超電導の背後で磁性が重要な役割を果たしていることを示す強力な証拠を提示した。研究グループは、1979年に発見された重い電子系物質について、この物質が発見された当時には存在しなかった新しい実験手法と理論的知見を適用してこれを調べ直した。重い電子系物質を試料として中性子照射を行い、系の電子スピンの状態について解析したのだ。MPI-CPFS の中性子回折の専門家 Oliver Stockert は次のように述べた。「我々の中

中性子回折データは、セリウム系の重い電子系物質が量子臨界点近傍にあることを示している。さらに、物質が超電導体になる時、磁気スペクトルが変化していることが分った。」今回得られたデータを元に、理論的解析を行った結果、系が超電導状態になった時に得られる磁気エネルギーの利得がクーパー対形成に必要なエネルギーの 10 倍以上にも上がることが明らかとなった。このような大きなエネルギー利得の意味するところは今後の研究によって明らかにする必要があるが、近藤効果として知られる現象と関連がある可能性がある。研究グループの結果は、**Nature Physics** オンライン版に掲載された。

(出典)

“Study probes link between magnetism, superconductivity”

Rice University press release (December 13, 2010)

<http://www.media.rice.edu/media/NewsBot.asp?MODE=VIEW&ID=15181>

[超電導 Web21 トップページ](#)

【隔月連載記事】

やさしい超電導リニアモーターカーのお話 (その1)

～リニアモーターカーとは～

財団法人 鉄道総合技術研究所
浮上式鉄道技術研究部
低温システム研究室長 長嶋 賢

1. 実用化されたリニアモーターカー

リニアモーターカーというとどんなイメージを思い浮かべるだろうか? 「未来の超高速列車」というのが一般的な答えかも知れない。しかし、リニアモーターカーは超高速列車だけとは限らないし、未来ではなく現在、日常生活に入り込んできつつある。既に、大阪、東京、神戸、福岡、横浜の5都市で開業している「リニアメトロ」と言われる地下鉄もその一つである (<http://www.jametro.or.jp/linear/menu.html>)。レールの上を鉄車輪で走行するため、乗っている人も気がつかない場合が多いが、レールとレールの間に敷いたリアクションプレート (アルミまたは銅と鉄の複合板) と車両側の電磁石がリニア誘導モータを構成する立派なリニアモーターカーなのである。リニアモーターカーの定義は回転式のモータで走行するこれまでの電車と違い、モータを直線状 (linear: リニア) に展開し、その一部 (この場合はリアクションプレート) を軌道側に配置して、車両を直線運動させる交通機関のことである。

この他に、日本国内で既に実用化された (営業している) リニアモーターカーとしては名古屋市の藤が丘駅と豊田市の八草駅間約9 kmを最高時速約100 km/hで結んでいる愛知高速鉄道東部丘陵線 (愛称: 「リニモ」) (<http://www.linimo.jp/>) もある。これは日本航空が空港アクセス用に開発を開始した「HSST (High Speed Surface Transport)」 (<http://hsst.jp/index.html>) の技術を適用している。

また、中国の上海には浦東国際空港と上海市郊外の竜陽路駅間約30 kmを営業最高時速430 km/hで結ぶ「上海磁浮列車 (上海マグレブ)」 (<http://www.smtdc.com/>) がある。これはドイツで開発された「Transrapid」 (<http://www.transrapid.de/>) の技術を導入したものであり、文句なく「超高速列車」と言って良いだろう。

しかし、この3種類のリニアモーターカーは超電導技術を使っていない。実用化間近と言われるJR方式のリニアモーターカー (以下ではJR-Maglev) だけが超電導技術を適用したシステムである (http://www.rtri.or.jp/rd/openpublic/rd77/yamanashi/maglev_frame_J.htm)。

2. 何故リニアモータなのか?

リニアモーターカーにはJR-MaglevやTransrapidの様に超高速を目指すものと、リニアメトロやリニモの様に、在来方式鉄道並の速度域への応用がある。これらは何故リニアモータを使うのだろうか?

新幹線を含む従来の鉄道は、推進力や、制動力 (ブレーキ力) を車輪とレールの間の摩擦力に依存している。この摩擦力を鉄道の世界では粘着力と呼んでいるが、粘着力は、車両の速度が上がるにつれて低くなる。一方、車両の速度が上がるにつれて空気抵抗などの走行抵抗が増えてくるので、走行抵抗が粘着力を上回る速度域に達すると、車輪にいくら動力を伝えても車輪は空転し、それ以上の加速が得られなくなる。車輪・レール間の粘着力は、例えば雨などが降るだけで大きく影響を受けてしまう。最近では技術が進み、世界的に鉄道の高速度化も進んでいるが、天候に左右されずに超高速走行を達成するためには粘着力に頼らず、安定して推進力を得ることが必要である。その手

段がリニアモーターなのである。

他方、高速システムではないリニアメトロでは、車両やトンネルの断面積が小さくできるので建設コストが安くできること、急カーブや急勾配に強いことなどをリニアモーターのメリットとしてあげている。また、リニモでは、振動、騒音が無いこと、車両がレールを抱え込んでいるので、脱線が無く、安全性が高いこと、建設コストと保守コストが安いこと、急勾配・急カーブにも対応できることをアピールしている。この様に、超高速が実現できるということだけでなく、コスト低減、環境負荷低減ができることもリニアモーターの特長である。

3. 推進方式による分類

リニアモーターカーは次ページの表のように、推進方式と支持（浮上）方式で分類することができる。まず推進方式のリニアモーターの分類であるが、これにはリニア誘導モーターとリニア同期モーターの2種類がある。

リニア誘導モーターは、車両に搭載したコイルに交流電流を流すことで進行磁界を発生し、この磁界が地上に配置したリアクションプレート（金属板）に誘導する電流との間に働く電磁力で推進する。地上側にはリアクションプレートを置くだけで良いので建設費が安くて済むが、高速域での推力特性が低下するので、高速システムには不向きである。こちらはリニアメトロとリニモで適用されている。

リニア同期モーターは、地上側に設置したコイルに交流電流を流すことで進行磁界を発生し、車両に搭載した磁石との間で発生する電磁力で推進する。こちらは高速域まで推力特性が良いので、高速システムに適しており、Transrapid と JR-Maglev に適用されている。

4. 支持（浮上）方式による分類

車両の支持（浮上）方式には、既に述べたように鉄輪方式と磁気浮上方式の2種類がある。高速鉄道の車両支持方式として、空気浮上方式というものも検討されたこともあったが、この方式は騒音が大きいかことやトンネル内での走行が難しいこと、すれ違い時に車両相互が影響を及ぼしあうこと、などの理由から鉄道への応用には至らなかった。鉄輪方式も騒音や保守の理由で高速化が難しいとされ、超高速リニアモーターカーの車両支持方式としては磁気浮上方式が適していると考えられている。表にあげたリニアモーターカーでもリニアメトロ以外は全て磁気浮上方式である。磁気浮上は英語で「マグレブ」(maglev : magnetic levitation 「磁気浮上」の略語)と言われる。日本国内では「リニアモーターカー」という言葉は通りが良いが、国際的にはこの「マグレブ」という言葉の方が一般的である。

磁気浮上方式はさらに2種類に分けられる。電磁吸引制御方式(EMS : electromagnetic suspension の略語)と電磁誘導方式(EDS : electrodynamic suspension の略語)である。

電磁吸引制御方式は電磁石の吸引力で車体を支持する。Transrapid もリニモもこの方式である。吸引力で浮上することから、どちらのシステムもモノレール状のガイドウェイを車両が抱え込むような形となっている。また、吸引力を制御しないと車上の電磁石がガイドウェイに吸着されてしまうので、吸引力制御が不可欠である。この吸引力制御の状態、車両は走行しているときも停止しているときも常に浮上しているので、本方式は車輪を持たない。しかし、(超電導磁石では無い)電磁石の吸引力には限界があるため、車両と軌道間の空隙は1 cm 程度となっている。

電磁誘導方式は、上で挙げたシステムの中ではJR-Maglev だけである。電磁誘導の法則を利用した浮上方式のため、浮上力は一定の速度以上では自然に得られ、浮上に伴う制御が不要である点の特長である。低速域では車輪によって車体を支持しており、航空機のように速度が上昇した際に車輪を引っ込めて浮上走行に移る。軽量かつ強力な超電導磁石を搭載することによって、車両と軌道間に10 cm 程度の大きな空隙を確保しつつ、十分な浮上力を得ることが可能で、高速走行に有利

である。

JR-Maglev については、誤解が多いようである。一番良く聞くのが、地上側に超電導コイルを敷き詰めると思われていること、もう一つは浮上の原理が「マイスナー効果」だと思われていることである。どちらも間違いであるが、次回以降で、超電導リニアモーターカーの原理や歴史について説明し、この様な誤解を解いていきたいと思う。

リニアモーターカーの分類

推進方式	支持(浮上)方式	開発事例と現状
リニア同期 モータ 高速走行向き	磁気浮上方式 (電磁誘導方式:EDS) 超電導磁石を使用 (車両-軌道空隙:大)	JR-Maglev (開発国:日本) ・宮崎実験線(1977~1996) (最高速度:581km/h) ・山梨実験線(1997~)
	磁気浮上方式 (電磁吸引制御方式:EMS) 常電導の電磁石を使用 (車両-軌道空隙:小)	Transrapid (開発国:ドイツ) ・エムスランド実験線(1983~) (営業最高速度:430km/h) ・上海磁浮列車(2003~)
リニア誘導 モータ		HSST(開発国:日本) ・愛知高速交通東部丘陵線 (営業最高速度100km/h) (愛称:リニモ)(2005~)
地上設備簡便	鉄輪方式	リニアメトロ(開発国:日本) ・地下鉄大江戸線 など

[超電導 Web21 トップページ](#)

読者の広場

Q&A

Q:「ニホウ化マグネシウム超電導膜の高速合成に成功したと聞きましたが、どのような製造法でしょうか？」

A: 今回、ニホウ化マグネシウム (MgB_2) 超電導膜の高速合成に成功したのは、エアロゾルデポジション法 (AD 法) と呼ばれる方法です。AD 法とは、固体状態のセラミックス微粉末をガスと混合し、煙幕のようなエアロゾル状態にして、常温で基板に吹き付けることにより、セラミックス膜を形成する技術です。

この手法の特徴は、他の蒸着手法と異なり、高真空を必要としないことです。成膜時に、加熱することなく、機械的な衝撃力だけで、緻密なセラミックス被膜を形成できるうえ、噴射したあと熱処理をせずに、原料粉の材料特性がそのまま得られるという点でも画期的な手法です。産業技術総合研究所によって開発された手法で、すでに数多くのセラミックス材料で実績があり、商品化も進んでいます。

今回、AD 法を超伝導の MgB_2 超伝導膜の製法に適用し、常温の成膜したままの状態、熱処理を施すことなく、39 K の臨界温度を得ることに成功しました。1 μm 程度の粒径の MgB_2 原料粒子を通常の焼結法により合成し、Ar ガスと混合し、煙幕のようなエアロゾル状態にしました。100 Pa に減圧されたチャンパー内でノズル (0.2 mm ϕ) を通して、10 x 10 x 0.5 mm³ 寸法のアルミナ (Al_2O_3) 基板に噴射して、約 5 μm 厚の被膜を形成しました。組織観察の結果、 MgB_2 膜と基板の密着性はよく、界面に剥離やクラックはまったく認められませんでした。また、X 解回折により、 MgB_2 相が形成されていることも確認しています。

AD 法には、多くの利点がありますが、その製膜速度の大きさも特徴のひとつです。なんと、従来の薄膜技術と比較すると、約 30 倍以上の高速製膜が可能です。

今後の観察と解析が必要となりますが、従来の AD 法の解析結果から考えると、今回、噴射した 1 μm 程度の粒径の MgB_2 原料粒子は、 Al_2O_3 基板上に吹き付けられ衝突した時、温度上昇による変化をほとんど経ずにサブミクロンサイズの微結晶粒子に破碎・変形され基板に密着した結果、緻密なナノ結晶組織のセラミックス厚膜が形成されたものと考えられます。薄膜の配向化が達成されており、 MgB_2 においても同様の効果が期待できます。ただし、AD 法による超伝導膜生成機構の解明には、さらなる研究が必要となります。

AD 法は、高真空を必要とせず、製膜速度もはやく、熱処理も必要としないことから、低コストかつ高品質の超伝導線材を合成する手段となる可能性があります。また、基板の種類も選ばず、金属基材の上での製膜にも成功しています。現在は、Y-Ba-Cu-O 系など、他の超伝導材料にもトライしています。

回答者：芝浦工業大学 工学部材料工学科 教授 村上雅人 様

[超電導 Web21 トップページ](#)