

超伝導加速空洞の欠陥検査システムの開発

化学研究所 附属先端ビームナノ科学センター
頓宮 拓

はじめに

高エネルギー物理学における主要な加速器計画の一つである ILC（国際リニアコライダー；International Linear Collider）計画（図 1）は欧州原子核研究機構（CERN）で稼動している LHC（大型ハドロン衝突型加速器；Large Hadron Collider）と相補的な役割をはたす次世代加速器で線形加速器（全長約 30km）を用いて電子、陽電子をそれぞれ 250GeV まで加速し 500GeV で衝突させる。

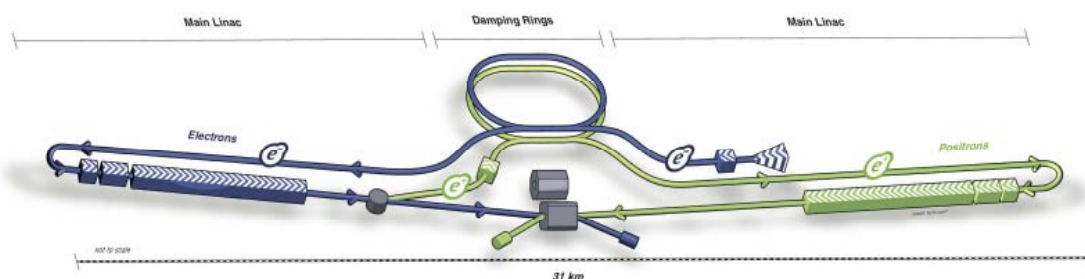


図 1：ILC（国際リニアコライダー） ILC news line, 23 August 2012

荷電粒子を高エネルギーまで加速するにはシンクロトロンなどを用いて加速空洞を何度も通過させていたが、電子、陽電子の場合は陽子などに比べ質量が軽く、偏向に伴うシンクロトロン放射によるエネルギー損失が大きくなるため線形加速器が有効とされる。ILC では 35MV/m 以上（加速器の平均加速勾配 31.5MV/m）の加速勾配を実現するために主加速器には約 15000 台のニオブ製の 9 セル L-band 超伝導加速空洞（図 2）を使用する計画で加速空洞の開発、製作のための研究がアジア、アメリカ、ヨーロッパで行なわれている。日本では高エネルギー加速器研究機構（KEK）を中心に研究が進められている。

超伝導加速の最大の特徴はその加速効率の高さであり、マイクロ波電力の損失を削減しつつ高い加速電場が得られ、連続運転では常伝導加速管に比べ小型化を実現できる。加速勾配の上限は空洞内の表面状態に大きく依存し、高加速電界では加速空洞の内壁表面に存在する微少欠陥（数 $10\mu\text{m}$ ）による発熱、電界放出電子などの原因でクエンチ（常伝導へ転移）が起こる。高圧超純水洗浄や電解研磨などの表面処理法により高い加速勾配が得られるようになってきているが、ILC 加速空洞の開発現場において効率的に空洞内の表面状態を非破壊で検査、欠



図 2：ニオブ製 9 セル超伝導加速空洞
（長さ約 1.2m）

陥除去することが求められている。現在、欠陥観察では高解像度カメラによる加速管内表面の光学的観察（図3）が欠陥観察の主流となっている。また、超伝導下での高周波電力入力による加速空洞性能試験（縦測定：図4）において空洞外表面の温度センサーによる発熱箇所探索、X線放射量の測定による電界放出場所の探索など間接的な現象測定による検査が行われ、およそその欠陥場所の特定により光学的欠陥観察が容易になり、欠陥の修繕作業などを効率的に行うことが可能となる。すでに KEK-STF（超伝導リニアック試験施設）では ILC 性能を達成している超伝導空洞は完成しており、電界研磨等による空洞内面処理技術および上記の光学的観察および欠陥探索方法と局所研磨修理機による超伝導製作プロセスを用いた歩留りは 90%以上を実現している。現在の研究開発は高品質の加速空洞を大量生産するための工業化の確立が目標となっている。

京都大学化学研究所では KEK との共同研究で超伝導加速空洞の開発効率、生産性の向上を目的として上記の光学的観察システムをはじめ発熱位置探索 (T-map)、X線検出 (X-map)、加速空洞成形前のニオブ板の欠陥検査を行うことができる過流探傷装置（図5）やX線イメージングによる精密非破壊検査（図6）についての研究開発を進めてきた。T-map 欠陥探索システム開発における小型センサーの高密度実装、極低温環境への熱負荷軽減を目的とした回路開発、動作検証実験など超伝導環境における T-map システムの開発について紹介する。



図3：内面検査カメラ（京都カメラ）



図4：縦測定（空洞性能測定）準備
左：クリーンルーム内、センサーの設置
中：クライオスタットに挿入
右：He 充填中

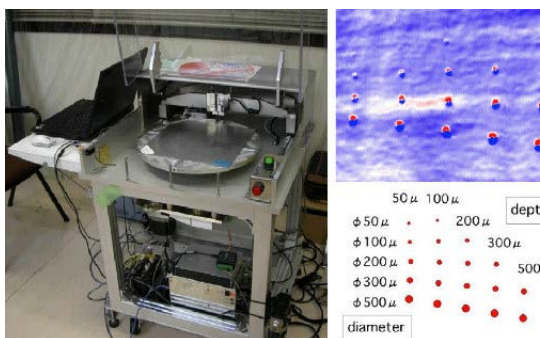


図5：過流探傷装置と疑似欠陥の測定結果

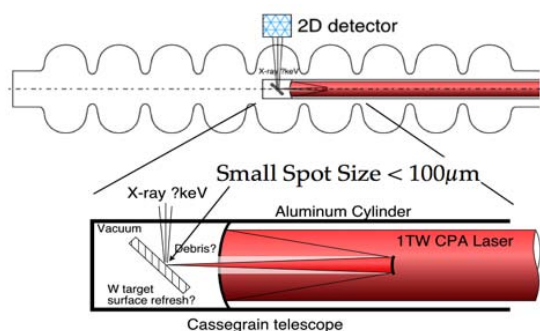


図6：X線イメージング

京大 T-map システム

クエンチの起因は製造時の溶接ビードやプレス加工における欠陥（100 μm 以上）や電界研磨による表面処理時の残留不純物（10 μm 以上）であり、高電界、高磁界において複数のプロセスにより発熱が起こり、クエンチに至る。（図7）T-map は縦測定においてクエンチの原因となる発熱を空洞外壁に設置した多数のセンサーで検出、位置を特定する欠陥探索法であり、その内部欠陥情報をもとに空洞製造、修理（局所研磨）にフィードバックを行う。空洞製造の工業化において欠陥位置の特定は必須のプロセスであり、高効率運用（簡便なシステム）、性能歩留り向上（高分解能測定）、低コスト（低価格の測定機器、He 使用量の削減）を追求し、下記の技術開発を軸に T-map 欠陥検査システムの製作を進めてきた。

（1）クライオスタット内（低温環境）にマルチプレクサ、アンプ等を配置し、高速チャンネル切替えによる多点測定を行う（図8、図9）。クライオスタット内にチャンネル切替え回路を設置することで劇的な低温と室温との間のケーブル削減が可能となる。これにより低温環境に対する熱負荷の軽減がされ、液体ヘリウム使用量削減による低コスト化、また多点測定による高分解能の欠陥位置探索による作業効率向上が期待できる。

（2）温度センサーとして採用する酸化ルテニウムチップ抵抗は 10K 以下で抵抗値が大きく変動する（図10）。市販されている極低温用の温度計は高性能であるが非常に高価であり、多点測定での使用は現実的ではない。また、KEK および他研究機関が採用している極低温用の温度センサーとして実績のあるアーレンブラッドレ

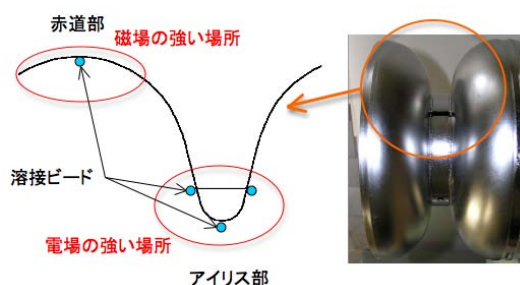


図7：クエンチ発生が多い場所

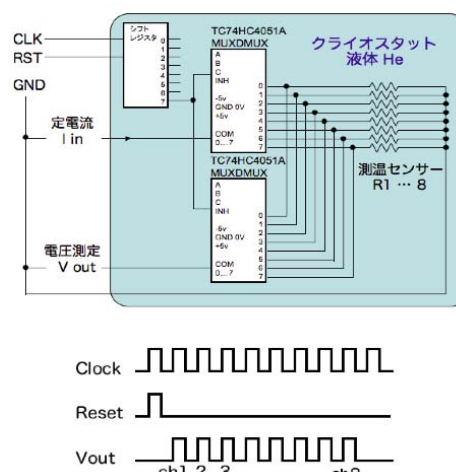


図8：T-map 回路

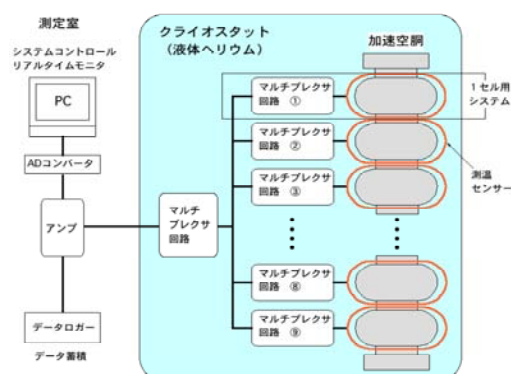


図9：T-map システム

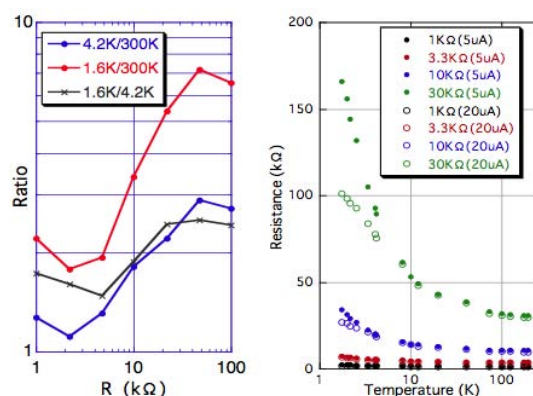


図10：酸化ルテニウム抵抗の温度特性

一社のカーボン抵抗は現在生産中止となっており、利用は市場在庫のみとなっている。酸化ルテニウムチップ抵抗は上記センサーに比べセンサー性能は低い（10K 以下の感度はアーレンブラッドレー社の 100 Ω カーボン抵抗と比較して約 1/5）が、低コスト、入手の容易さのメリットは大きい。液体ヘリウムの温度変化を感知することを目的とした場合、T-map 用センサーとして十分な感度を持っていることは測定済みである。また、ニオブ製空洞の壁厚と熱伝導による測定感度、位置精度の見積りから 1cm² 当たり 1 個のセンサー密度を予定している。これは 9 セル空洞の測定において約 1 万個のセンサーを使用する超多点温度測定となる。

（３）上記２点を実現するためセンサーの実装にカプトンベースのフレキシブル基板を採用する。簡便な装着による作業効率向上とセンサーの高密度実装を両立することが可能である。

液体ヘリウム環境での回路の動作試験、基板の強度や低温サイクルによる劣化、センサーの感度等の実験を行い、空洞のクエンチ検知に運用可能な試作基板を製作した（図 1 1、図 1 2）。現在、試作基板を用いたクエンチの検知実験を進めている。発熱に対する感度は十分であり、KEK で運用中の T-map システムに近い測定結果を得ることができた。

今後の計画

試作した基板は 4 枚であるが 4 枚をシリーズ接続した試験で問題なく運用できた。今後は図 9 に示す 9 セル空洞用に T-map センサー 9216 個（基板 144 枚）の製作と設置治具の設計を行う予定である。

この T-map システムの特徴は極低温環境において超伝導加速空洞表面の温度異常を検知するために高速スキャンングおよび高位置分解能の温度マッピングを簡便な装備により可能にすることであり、この開発により超伝導加速空洞の開発研究、生産においてコストおよび製作効率に貢献が期待できる。また、超伝導技術の利用においてその温度環境制御のためには温度測定が重要となる。例えば低コストの液体ヘリウム液面計や次世代エネルギー蓄積装置に使われるような大形超伝導コイルの各部の動作温度管理システムなど、局所的温度上昇の有無を管理できる安価な多点温度測定は産業分野、学術実験にも応用が期待できる。

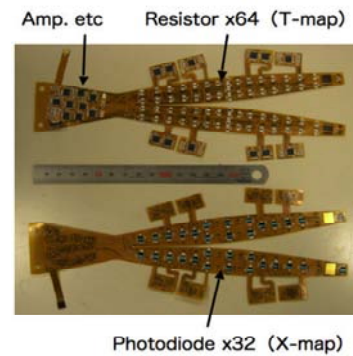


図 1 1 : T-map 試作基板
基板の表面に T-map センサー、裏面に X-map (X 線検知) センサーを配置

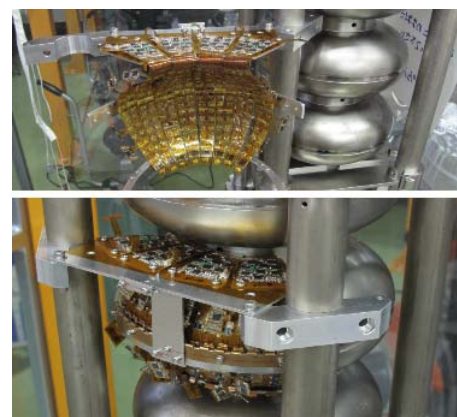


図 1 2 : 試作基板の実装
空洞の 1 セル 45° 部分（基板 4 枚）に試作基板を実装