

# A COMPACT ZERO-BOIL-OFF SUPERCONDUCTING ACCELERATOR AND REFRIGERATORS

Eisuke J. Minehara, WERC (The Wakasa Wan Energy Research Center)  
64-52-1 Nagatani Tsuruga, Fukui, JAPAN 914-0192

## Abstract

A compact Zero-Boil-Off (ZBO) superconducting accelerator with cryogenic refrigerators was first built for the JAERI free-electron laser project at Tokai, Japan and the second machine as the sister ones for European neutron source test accelerator at Juelich, Germany. The design concept was issued as Japanese domestic patent about 19 years ago, and will be expired soon. After about 20 years successful operation of the JAERI modules, we should summarize the original goals and technological results and hope to extend or to improve them as an industrial ZBO module for future ERL-FEL, positron source, electron irradiator and other applications.

## 無蒸発型超伝導加速器と冷凍機

### 1. 原研FELの小型無蒸発型超伝導加速モジュールと冷凍機

原研FELの超伝導加速器モジュール[1]は、加速空洞形状設計としてDESY(ドイツ電子シンクロトロン研究所)技術と住友重機製小型閉回路He冷凍機を用いた、原研で開発された冷却設計[2]のモジュールを用いてドイツ連邦共和国ベルギッシュグラートバハのインターアトム社工場(現在、アケル社)で製作された。3重の断熱層と2重のサーマルアンカーを持つこのモジュールは、原研FELが有限要素計算コードANSYSの温度分布の計算と試験用クライostatで冷却性能や熱進入実測で最適化を行った。冷凍機は、住友重機製で元々JRのリニア山梨実験線の車両用に設計製作され、リニア宮崎実験線の4W機から8W機に増強されたものであった。

クライostatの形状、周辺の冷凍機、低温設計などは図1, 2に示されている。液体ヘリウム冷媒の循環/代わりに蒸発した液化ヘリウムの再凝縮熱交換で冷却する常時連続運転した4K冷凍機SRJ2008は1年毎の交換、液体窒素代わりに10K/50Kの熱シールドを冷却したGM(ギッフォード・マクマホン)冷凍機RD220は通常2-3年毎の交換で4年以上運転できた機械も含めて全期間に渡り故障はなかった。この交換までの期間は、4KのSRJ2008では、個々に大きくばらついていて常時2台程度の予備機を置いて、故障による蒸発が始まる前に交換を行った。SRJ2008は比較的短時間約15分で交換でき、交換後2.5時間くらいで冷却開始できた。故障でなくても冷却能力が低く、調子が悪いものは早めに交換した。RD220はほぼ完全に無故障であったので、定期的に交換できたが、固定をクライostat真空断熱槽にフランジ止めであったので交換は冷却部分全体の温度上昇と液化ヘリウムの回収が必要であった。この時間がかかる作業を省略するため

冷却のための断熱膨張を起こさせるディスプレイの部分からの交換のみを低温のまま行う「コールドメンテ」方式に切り替えて、最後の9年程度はクライostatのGM冷凍機交換もクライostat全体の昇温を行わずに、連続低温保持して運転を行った。コールドメンテは図3にあるように行った。

最初の技術目標は以下のように達成された。①運転保証時間内での交換による安定な無蒸発冷凍機運転(交換間隔はSRJ2008約1年、RD220約3-4年)、②交換中も昇温しないコールドメンテの実行と実現、③10年以上に渡る無昇温、無蒸発の冷凍機運転の実現、④24時間365日10年以上の連続低温保持運転(短時間2-4時程度の交換作業を除く)を実現、④少ない熱侵入量設計値1W、実際は計装用ケーブル類などを經由する熱侵入量の増加により2.4W程度が得られている。[1]

### 2. 次期超伝導加速空洞モジュールの改善

最大の改善項目は、4K冷凍機の交換間隔を2倍程度に伸ばすことである。このために不定期な故障を起こしていたSRJ2008を確実に約2年間運転する必要がある。SRJ2008のもともとの運転保証時間は5000時間であるがRD220が4年程度安定に動いていることから十分に可能と考えている。実績のあるSRJ2008冷凍機はGM冷凍機にJTバルブをつけたものであるがSRJ2008の改良や磁性蓄冷材を用いた4KGM冷凍機や4Kパルスチューブ冷凍機など、また大型の液化装置も応用は可能である。

加速空洞共振器は、薄膜を高純度銅の共振器内側に貼り付けて製作する。これによりNb薄膜がなくてもPb薄膜メッキでも可能である。Nb薄膜の場合、磁場に強く、高価な磁気シールドを省略することが出来るかもしれない。Pb薄膜は、安価で繰り返し、同じ銅製の空洞共振器にメッキ付着と酸洗浄剥離を、高品質が実現するまで繰り返すことが可能で、安価

である。PbはTcが7Kと小さく、Nbの9.2Kの場合より表面抵抗が大きく、Q値が小さく得策ではない。また、空气中で酸化されやすく取り扱いも不便である。

以下に次期加速器モジュールで目標とする性能を示す。①4K冷凍機部品交換間隔2年、20K冷凍機交換間隔4年の実現。②SRJ2008相当4.2K冷凍機1台分8W-16Wの空洞冷却能力、③20K8W相当シールド冷凍機のシールド冷却能力、④コールドメンテの利用による10年程度の連続無昇温運転、⑤熱侵入量2W程度以下のサマルアンカーの実現、⑥昇温後、最初の冷却時に加速器運転用の冷凍機を用いて冷却・液化運転を実現する。但し、日本では県地域により高圧ガス取締法の規制により不可能な場合がある。図3は、コールドメンテの様子をしめす写真でHeガスが充填されたビニール中でGMのピストン(ディスプレイサー)の交換の様子が見える。

この加速器モジュールは、比較的小型で産業用超伝

導加速器モジュールとしてERL-FELや電子線照射装置などに応用可能と考えられる。この小さな冷凍機で高出力を得る方法は、冷凍負荷を小さくして、同時にビーム出力は同等とするためにビームをパルス化して総効率を十分小さくし、そのビームの総効率の逆数分、ビーム電流を上げるとビーム出力が同一で損失となる冷凍機電力負荷が減少したビーム効率分だけ少なくなる。ビーム発生のための電力が概略同一と考えられるので、消費電力のほとんどを占める冷凍機電力が大きく減少するとシステム全体の電気からビーム電力への電力効率が大きく改善する。UHFでは十分なZBOの実績があり、1台の8W4K冷凍機を用いて5連500MHz空洞を10%程度の総効率と10倍程度の大マクロ電流で実効ビーム電力がCW100%と同一の設計も製作も容易である。

L,Sバンドの様により高い周波数の空洞共振器では周波数の2乗に比例して高周波抵抗が増加することが効いて、高周波発熱が同様に増加し、冷凍機負荷が大きく増大する。これを補償するために2K以下まで冷却して使用する。これもZBO形式で可能である。2K小型冷凍機で試みて可能性を確認し、すでに報告している。

### 参考文献

- [1]峰原英介 Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 483A(2002)8-13.
- [2]峰原英介, 特許「超伝導加速装置」平成2年、特許第3094299号平成12年。

### JAEA Compact Stand-Alone Zero-Boil Off Cryostat

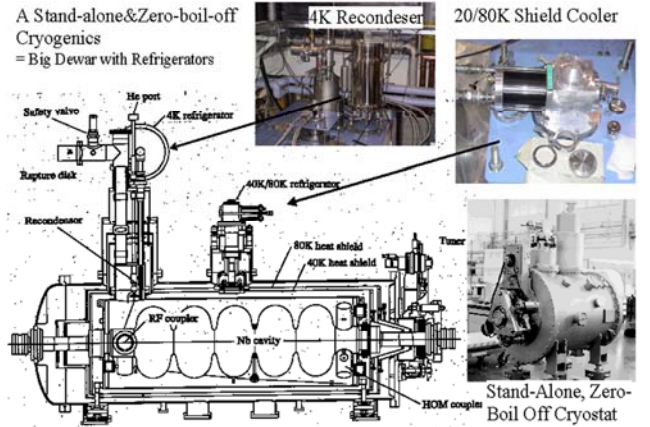


図1、JAERI ZBOクライオスタット説明図と写真。

### 原研ERL-FEL用小型無蒸発型超伝導加速モジュールの熱設計と冷凍機の例

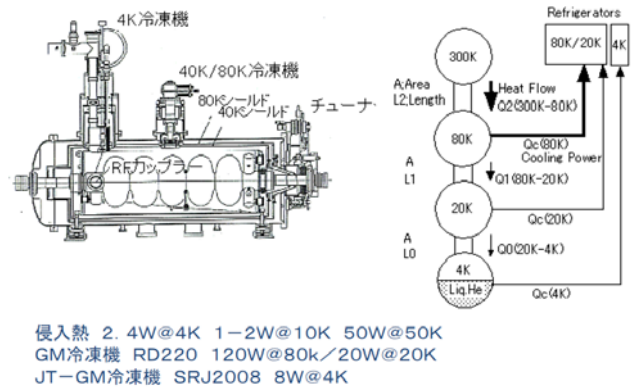


図2、原研ERL-FELモジュールと冷凍機。コールドメンテ GMのピストンの移動



図3、コールドメンテ作業写真、GM冷凍機ディスプレイサー。