

# QUENCH LIMIT STUDY OF SUPERCONDUCTING SOLENOID FOR POSITRON FOCUSING

Kazue Yokoyama <sup>#</sup>, Takuya Kamitani, Satoshi Ohsawa,  
Kenji Hosoyama, Kazufumi Hara, Kota Nakanishi, Toshiya Sanami  
High Energy Accelerator Research Organization (KEK),  
1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

## Abstract

To increase positron intensity in the linac for the SuperKEKB, positron capture efficiency will be improved by a strong focusing solenoid after a converter target. A super-conducting solenoid (SCS) is one of the candidates for a stronger focusing solenoid. SCS can provide a field distribution flexibly from the attributes of a good axial field symmetry compared with a flux-concentrator (FLC). One of the problem in using a SCS as a positron focusing magnet is the quenching by intense radiation from a converter target. Temperature, magnetic field strength and current density should be below certain critical limit curve defined for each super-conducting material. In designing SCS for positron focusing, a thickness of a radiation shield and coil dimension should be optimized for positron yield and temperature rise. To investigate the quench limits which hold the key to design the SCS, we performed a beam irradiation tests with a prototype solenoid and a cryostat which can contain a realistic converter target inside.

## 陽電子収束用超伝導ソレノイドコイル開発のためのビーム照射実験

### 1. はじめに

電子陽電子入射ライナックは、SuperKEKB に向けての性能向上のために様々な改造を進めている。陽電子ビームについては、陽電子生成標的直後の集束ソレノイドの改良、且つ、これまでより大口径の加速管を使用することにより陽電子の捕獲効率を向上させることが必要である[1]。

生成標的から出た陽電子を収束するマッチング部は、現在の QWT (quarter wave transformer) 系磁場分布を AMD (adiabatic matching device) 系に改良し、広いエネルギーアクセプタンスを持たせることにより、おおよそ2倍以上、陽電子捕獲効率を増やすことが期待できる。AMD 系用ソレノイドの候補として、大きなパルス電流で励磁する FluxConcentrator 型ソレノイドマグネット[2]と超伝導ソレノイドコイルの両方の可能性について検討を進めている。ここでは、超伝導ソレノイドコイルの開発の現状について報告する。

超伝導コイルを使用できると、磁場の軸対称性が非常に良いことや、コイル配置を適切に設計すれば理想的な AMD 用磁場分布を作れることなどのメリットがある。しかし陽電子生成標的からの強い放射線によりコイルが加熱され、超伝導状態の破れ(クエンチ)が起こる可能性があることが問題となる。ライナックのビームは非常に短いパルス(10 ps 長)になっているが、これまでに行ったビーム照射試験では、パルス加熱による過敏性よりも、時間的に平均した通常の DC 的加熱の方がクエンチ限界値の特性を決めているという結果が得られている[3]。そこで、実際の陽電子生成部に近い放射線環境での

クエンチ限界放射線量について定量的に調べるために、今回、超伝導ソレノイドコイル内部にタングステン標的を設置してビーム照射試験を行った。

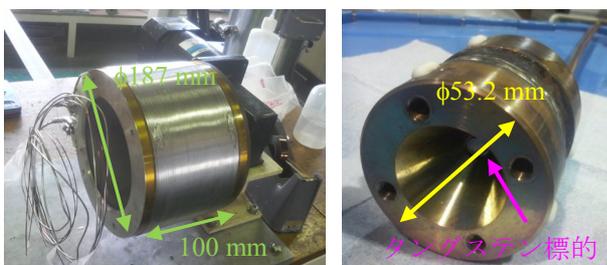
### 2. 実験のセットアップ

#### 2.1 超伝導ソレノイドコイルとタングステン標的

今回試作した超伝導ソレノイドコイル(内直径 139 mm、外直径 187 mm、長さ 100 mm、図 1 (a))を表 1 にまとめる。初号機コイルとして、NbTi 丸線( $\phi 0.65$ )を使用して試作をした[4]。一般に、平角線の方が丸線よりもクエンチトレーニング時間が短く安定した性能が得られるので、平角 NbTi 線(約 0.6 mm $\times$ 0.9 mm)を用いて 2 台製作した。線材の  $I_c$ - $B_c$  特性とこのコイル形状での巻き数から、期待できる臨界電流値が求まりその際の磁場強度が得られる。3 号機では、クエンチトレーニング後、ビーム照射試験用のクライオスタットに組み込みクエンチトレーニングを続けた。その結果、最大電流値は 143 A (センターでの最大磁場約 3.6 T) で、6 割程度の性能が得られた。図 2 にトレーニング履歴を示す。

図 1 (b) は試験用タングステン標的で、無酸素銅の中央部にタングステン棒( $\phi 6 \times 14$  mm)をロウ付けし、外周部に冷却水銅パイプを巻きつけた構造である。これまでパルスコイルを使用して運転していた際に使用していた標的とほぼ同程度の大きさである[5]。この試験用タングステン標的をコイルの中央に設置する。

<sup>#</sup> kazue.yokoyama@kek.jp



(a) 超伝導ソレノイドコイル。 (b) タングステン標的。

図 1 : 超伝導ソレノイドコイルとタングステン標的。

表 1 : コイルパラメータ (\*計算値)。

	#1	#2	#3
NbTi 線材のタイプ [mm]	丸線 φ0.65	平角線 約 0.6 × 0.9	
ターン数	5111	3570	3781.5
臨界電流値* [A]	167	267	257
磁場強度* [T]	5.7	6.3	6.4
センター磁場 *@100 A	3.38	2.36	2.5

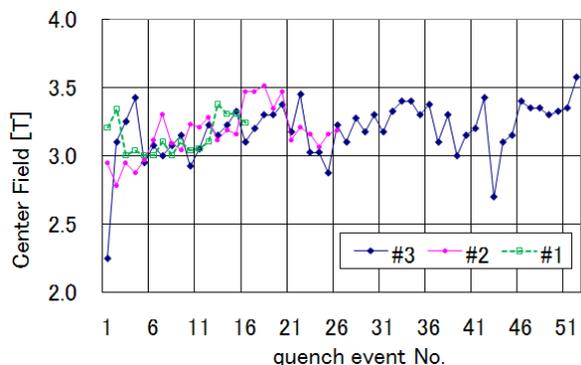


図 2 : 超伝導ソレノイドコイルのクエンチトレーニング履歴。

## 2.2 セットアップ

超伝導ソレノイド 3 号機コイルとタングステン標的を、液体 He 浸け置き型クライオスタット内に取り付けて、図 3 のように、ライナック途中のビームダンプライン (B8 ストレートライン) に設置した。シールド空間の制約上 (天井高さ 2 m)、クライオスタットはできるだけコンパクトに製作した (φ625 × 873 mm、液体 He 最大量 17 l)。その為、コイルを励磁しない場合でも自然入熱による液体 He の蒸発のため超伝導状態を維持できるのは、約 2 時間程度であり、クエンチが起きた場合にはクライオス

タット内の液体 He がほとんど全量蒸発してしまうため再注入しなければならない。電子ビームはターゲットから約 2 m 上流地点にある真空窓を通過して空气中を飛んでくる。今回試験した際のビームの最大条件は、パルス当たり電荷量約 7 nC × 2 bunch、繰り返し 49 Hz、ビームエネルギー 1.7 GeV である。

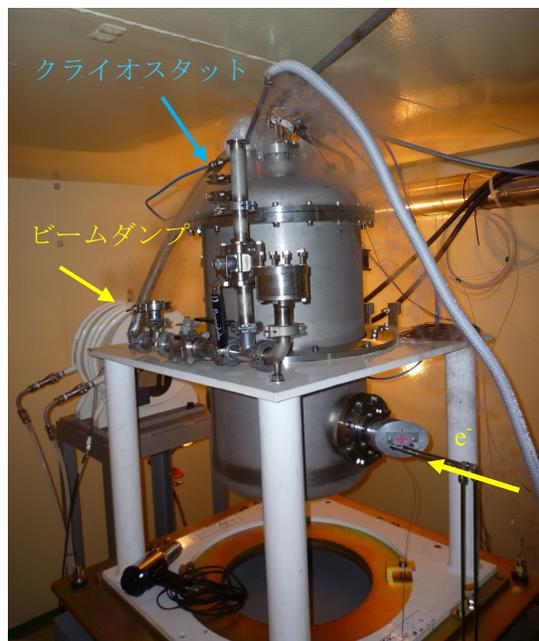


図 3 : 実験のセットアップ。

## 3. 実験結果と評価

コイル励磁電流は、クエンチ限界値より少し低いレベル 130 A (約 3.25 T) から実験を開始した。コイルを励磁した状態で、電子ビームの強度を変えてタングステン標的への照射実験を行った。ビームの最大条件まで徐々に強度をあげていき、クエンチに至る条件を調べた。図 4 に実験時のビームのチャージ量、繰り返し、励磁電流、センターでの最大磁場 (計算値)、液体ヘリウムの液面計読み値、コイル両端電圧、ターゲット周辺温度の履歴を示す。コイル励磁電流 130 A では、7 nC × 2 bunch、25 Hz に到達してから、液面計の変動は見られるものの、49 Hz にしてからも徐々に落ち着き、クエンチは起きなかった。この状態を約 10 分間保持した。その後、励磁電流を徐々に上げていき、ビーム照射状態でのクエンチ限界電流値を調べた。その結果、132 A (約 3.4 T) でクエンチが起きた。

ビームによるコイルの発熱量の分布は、特に標的の下流側、つまりビーム進行方向への放射線が大量に発生する (図 5)。シミュレーションにより 1 粒子あたりのコイルへのエネルギー付与のピーク密度を求めて、コイル線材密度と入射電子の個数より、エネルギー密度 (ピーク値) を推定した。今回の実験時のビーム条件でのエネルギー密度は、コイルの

一部では約  $90 \text{ mJ/cm}^3$  ( $\approx 2.35 \times 10^{-12} \text{ mW/g} \times 8.9 \text{ g/cm}^3 \times 49 \text{ Hz} \times 2 \text{ bunch} \times 7 \text{ nC} \times 10^{-9}/1.6 \times 10^{-19}$ ) と見積もることができる (但し、ここでは銅密度で概算した)。実機コイルの設計の際には、SuperKEKB でのビーム条件は、今回の実験よりもエネルギーは約 2 倍、チャージ量は約 3 割増しであること、又、実機用コイルでは磁場強度を 5~6 T で使用したい点を考慮して、放射線によるコイル部での発熱がこの程度に抑えられるように検討する必要がある。

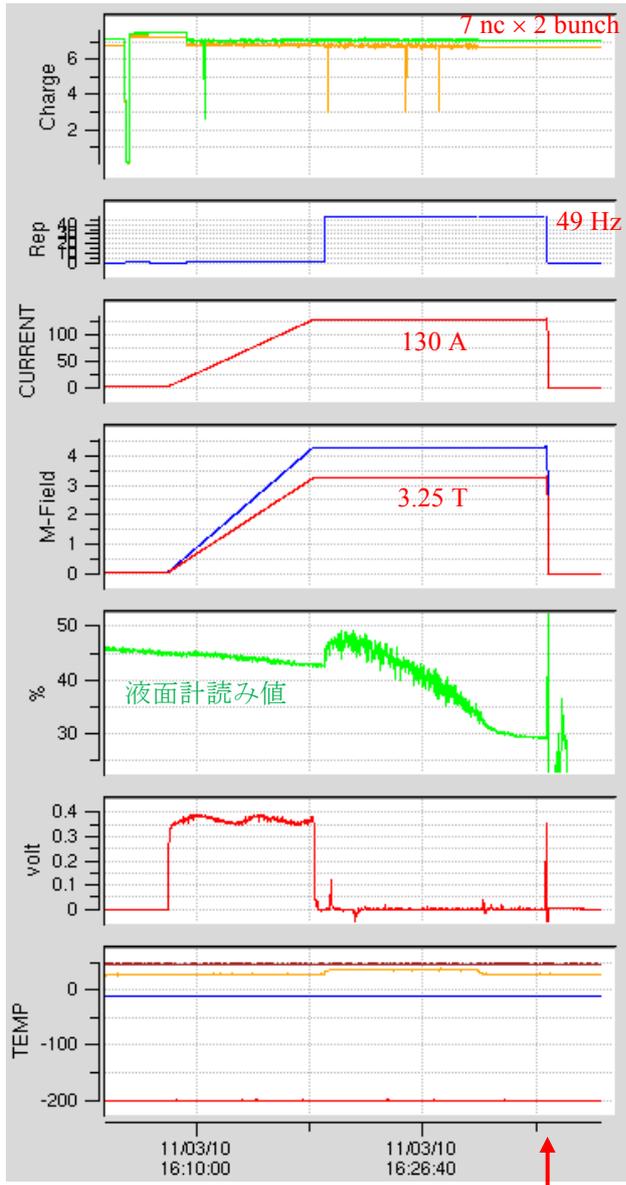


図 4 : 実験結果。赤矢印がクエンチ (励磁電流 132 A、約 3.4 T) した時間を示す。

#### 4. 今後の課題とまとめ

実用化には、放射線によるコイル部での発熱をクエンチが起きないレベルに抑え、超伝導コイルを安

定状態に保つ必要がある。今回の電子ビーム照射実験ではコイル励磁電流 130 A (約 3.25 T) では、 $7 \text{ nc} \times 2 \text{ bunch}$ 、49 Hz、1.7 GeV のビーム条件では問題ないことがわかった。しかし、SuperKEKB では陽電子生成標的に当たるビームの最大運転条件は、 $10 \text{ nc} \times 2 \text{ bunch}$ 、49 Hz、3.5 GeV であり、コイルの磁場強度も 6 T 程度に上げる必要がある。そのため、標的とコイルの間にシールド部分を設けて放射線による発熱量を抑える必要がある。又、今回試作した超伝導ソレノイドコイルの最大到達磁場強度が放射線を当てない通常的环境下でも超伝導線材の設計値の 6 割程度の性能であるため、この原因を探り、性能を出すための工夫が必要である。実運転に向けては、ビームライン上で使用するための実機用クライオスタットの製作も必要である。

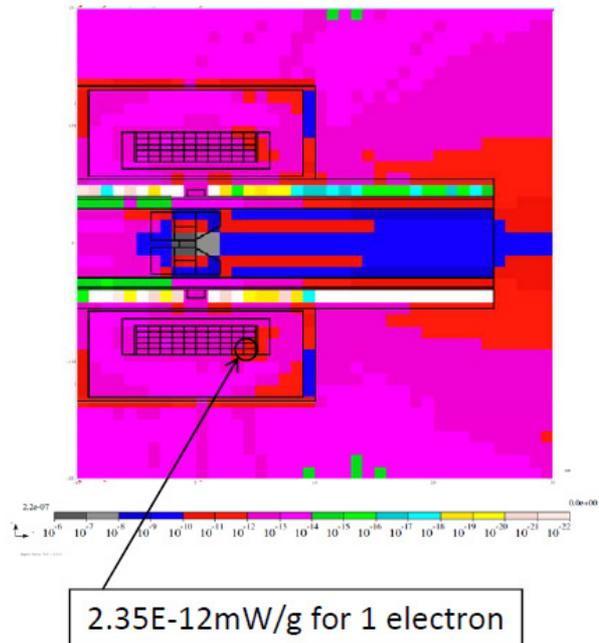


図 5 : 1 粒子あたりのコイルへのエネルギー付与のピーク密度分布。ビームサイズ  $\sigma_x = \sigma_y = 0.05 \text{ cm}$ 、エネルギー 1.7 GeV、コイル励磁電流 130 A。

#### 参考文献

- [1] 紙谷 琢哉、他、"SuperKEKB に向けた KEKB 入射ライナックの陽電子ビーム増強", TUPS028, in this meeting.
- [2] 牛本 信二、他、"フラックスコンセントレータ用磁場測定システムの開発(2)", MOPS051, in this meeting.
- [3] 紙谷 琢哉、他、"SuperKEKB に向けた KEKB 入射ライナックの改造計画", 第 7 回日本加速器学会, 姫路, 2010, WELH03.
- [4] 武井早憲、他、"大強度陽電子源の開発 (I I) 収束系への超伝導コイルの適応性評価", PNC TN9410 98-053, 1998.
- [5] 諏訪田 剛、他、"タングステン単結晶標的を利用した陽電子源", 第 4 回日本加速器学会, 和光, 2007, FO20.