



■ 2005年 春季低温工学・超電導学会

中性子磁気レンズ用 Nb₃Snコイルの開発 (2)

Development of Nb₃Sn Coil for
a Magnetic Neutron Lens (2)

^A上智大学、^B高工ネ研、^C理研、^D原研、^E(株)東芝

岡本佳祐^A、関佳隆^A、大野雅人^A、中村一也^A、尾智明^A、
満田史織^B、大内徳人^B、新富孝和^B、土屋清澄^B、安達智宏^C、清水裕彦^C、
奥隆之^D、鈴木淳市^D、木村諭^E、花井哲^E、浦田昌身^E、渡辺郁男^E



■ 中性子ビーム

- ・ X線と比べ、軽元素の識別性に優れる
- ・ 強度が弱いため、**ビーム収束技術**が重要



ビームの収束に有効な六極磁場

■ Nb₃Snコイルによる六極磁場

- ・ 六極では二極・四極ほどコイル厚に依存せず、磁場が強いほど中性子の収束に有効
- ・ 高磁場でNbTiより高い電流密度をもつNb₃Snへの代替を目指す

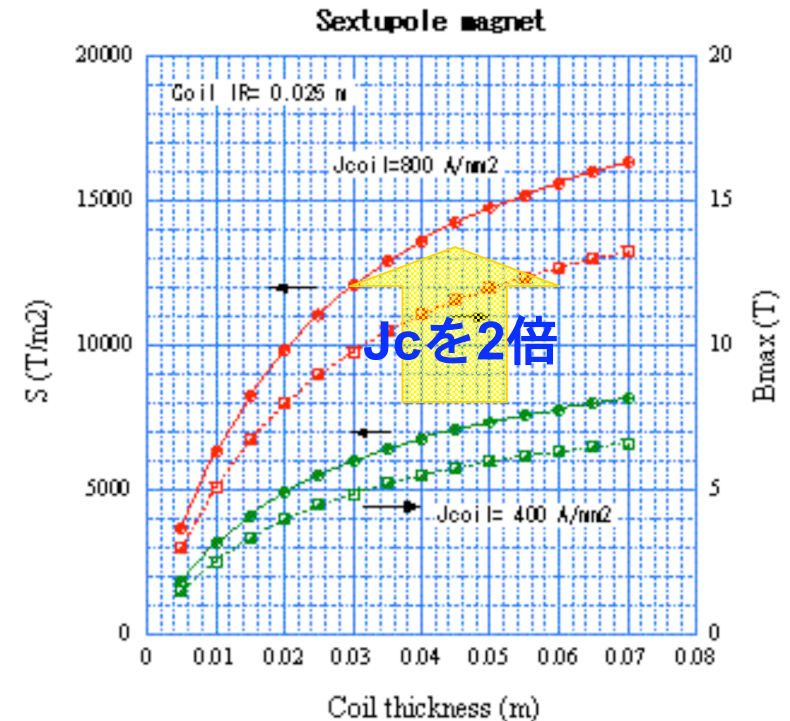


Fig. 1 六極磁石強度のコイル厚依存性

Nb₃Snコイル諸元

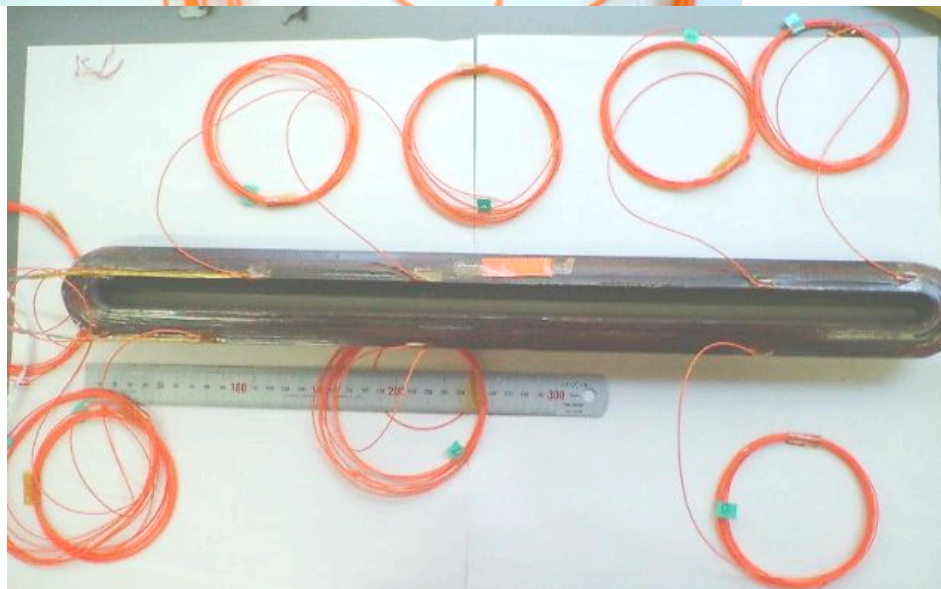
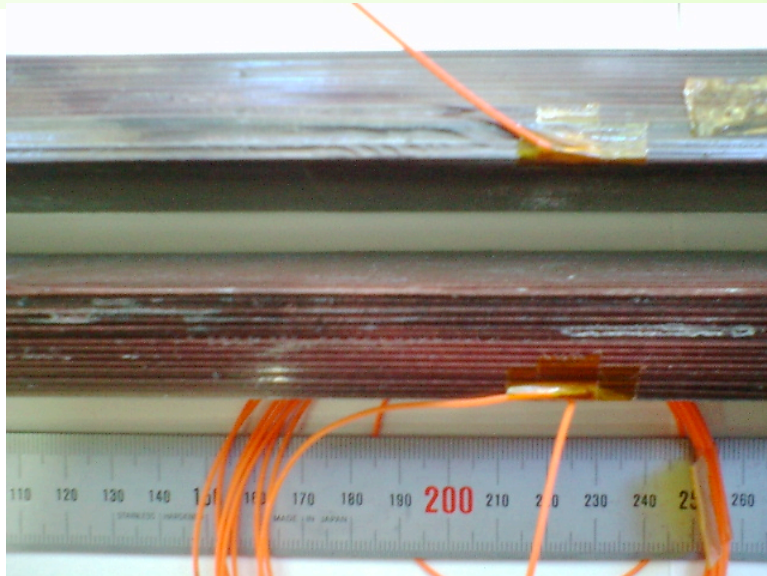


Table.1 Nb₃Sn線材の諸元

Manufacturer	Shape Metal Innovation
Diameter	1.00 mm
Copper	45.3 %
RRR	200
I _c , non-Cu J _c (@12 T)	988 A, 2300 A/mm ²

Table. 2 コイルの諸元 (1極分)

Coil length	0.5 m	
R inner	23.0 mm	
R outer	58.8 mm	
Number of turns	297	
B _{max} (@1000A)	6.910 T	
Overall coil J (@1000 A)	581.1 A/mm ²	
Stored energy	9.24 kJ	
Inductance	18.5 mH	
Force	F _r	89.35 kN
	F _θ	-245.5 kN

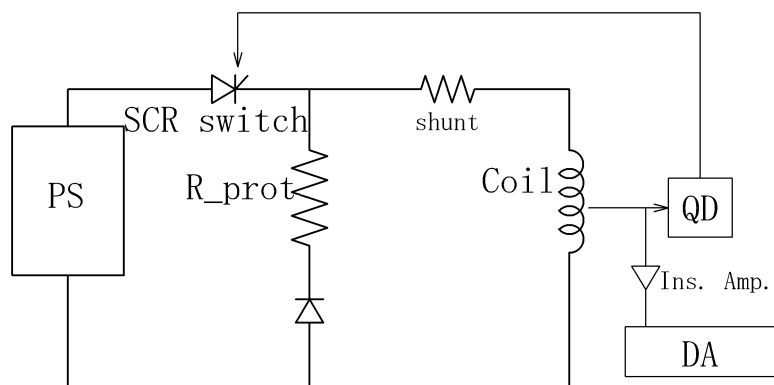
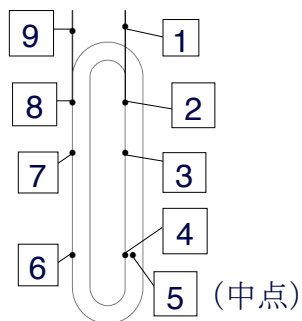


Fig. 2 励磁試験回路図



0.5mコイル

Fig. 3 電圧タップ取付位置

サイリスタスイッチにより遮断

遮断時間の遅れ：～1 ms

保護抵抗：0.4 Ω

遮断時定数

46 ms (0.5mコイル)

電圧信号の測定

各タップ間の電圧は、

データロガーで取得

入力チャンネル数：最大16

サンプリング間隔：50 μsec

測定方法(2)



測定項目 … 2個の50cm鞍型コイルで下記の試験・検討

◆ No.1

- 5回の遮断確認試験
- 13回のクエンチ試験
- サーマルサイクル
 - 1回の遮断確認試験
 - 12回のクエンチ試験
- リアセンブル
 - 2回の遮断確認試験
 - 14回のクエンチ試験

◆ No. 2

- 6回の遮断試験
- 17回のクエンチ試験
- サーマルサイクル
 - 3回の遮断確認試験
 - 9回のクエンチ試験

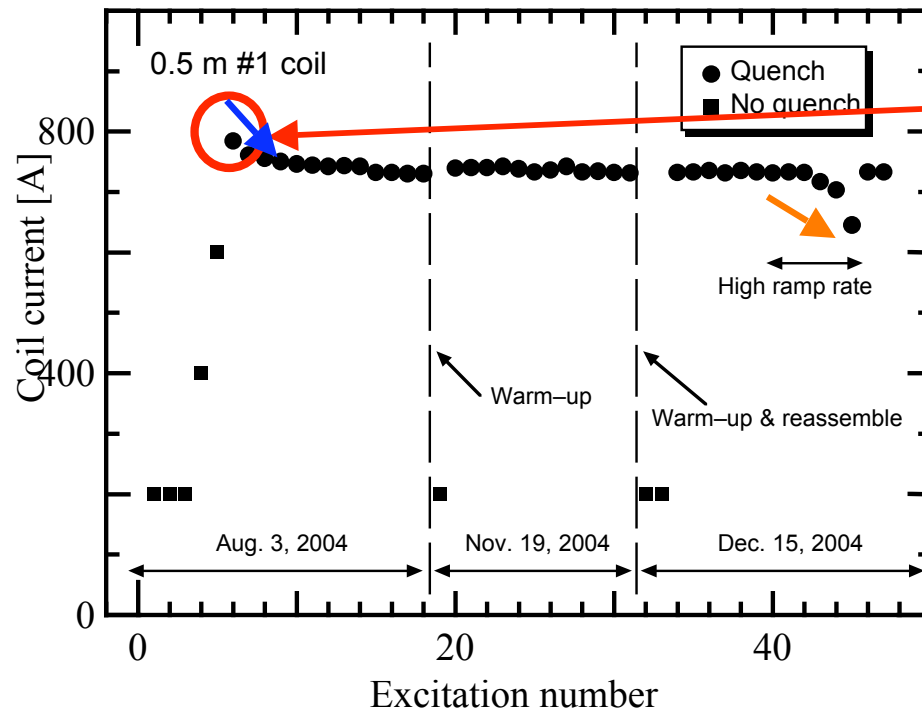


Fig. 4 コイルNo. 1励磁試験におけるクエンチ履歴

最大通電電流

784 A (6回目)

クエンチ発生個所

全てV4-5 (内側のターン)

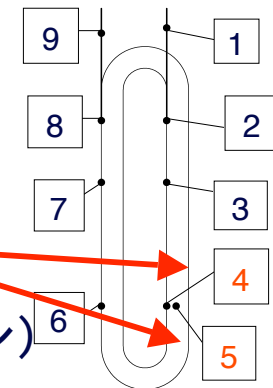
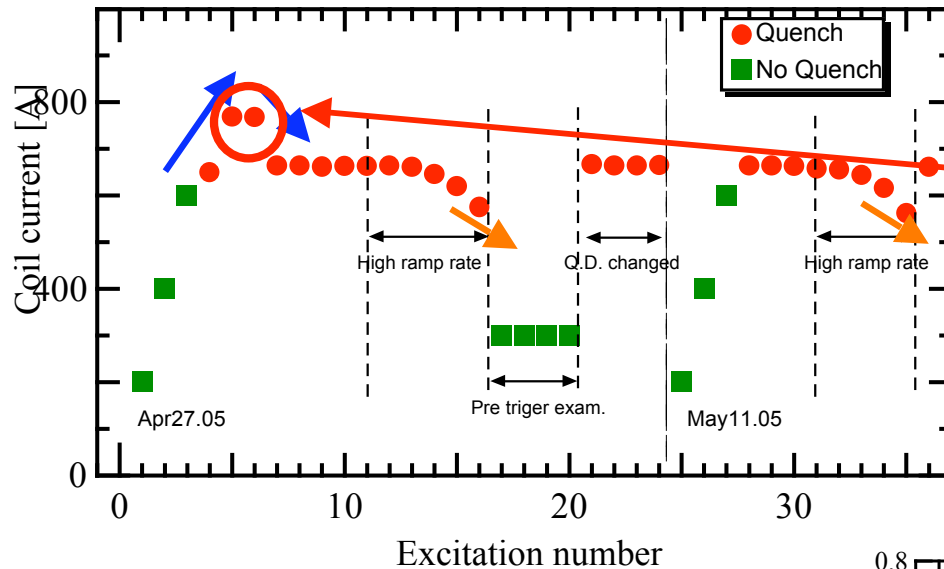


Fig. 5 タップ位置

- ✓サーマルサイクル後、リアセンブル後、クエンチ電流は向上しない
- ✓クエンチ発生はコイルの内層
- ✓高速励磁を行うとクエンチ電流が低下 (⇒後述)

励磁試験結果・検討 No. 2



最大通電電流

769 A (6回目)

クエンチ発生箇所

5, 6回目はV5-6 (外層)

以降は全てV4-5 (内層)

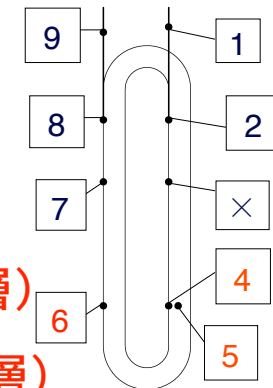


Fig. 7 タップ位置

Fig. 6 コイルNo. 2励磁試験におけるクエンチ履歴

✓5・6回目のクエンチ電流は4回目よりも向上 (トレーニング)

✓クエンチ発生箇所がスパイクが発生した4～6回目と以降で異なる

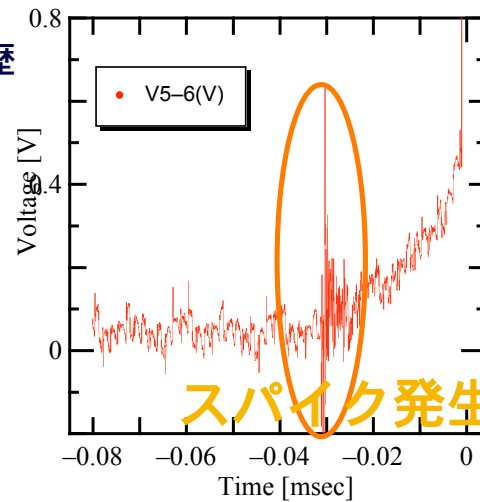


Fig. 8 4～6回目クエンチ発生箇所

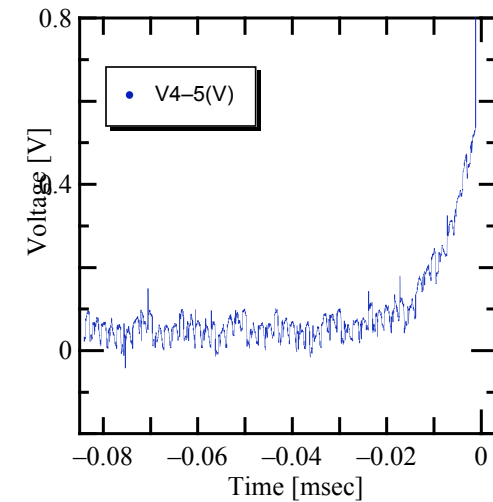


Fig. 9 クエンチ発生箇所

最高到達温度の推定 (1)



■ 推定方法

・ 熱平衡方程式よ $J^2(t)\rho(T)dt = C(T)dT$

り、
[$J(t)$: 電流密度, $\rho(t)$: 比抵抗, $C(T)$: 体積比熱,
 t : 時間, T : 温度]

・ 両辺を積分し $\int_0^{\infty} J(t)^2 dt = \int_{T_0}^{T_{\max}} C(T) / \rho(T) dT = F(T)$

・ 左辺を $MIITS = \int_0^{\infty} i^2 dt$ を用いて表すと、(単位 $MA^2 \text{ sec.}$)

$$\int_0^{\infty} J(t)^2 dt = \frac{10^6 \times MIITS}{A_{\text{wire}}}$$

・ この値を $F(T)$ 曲線※から読み取りコイル最高温度を推定する

※ A BURNOUT SAFETY CONDITION FOR SUPERCONDUCTING MAGNETS AND SOME OF ITS APPLICATIONS, P.H. EBERHARD, et al "NUCLEAR INSTRUMENTS AND METHODS 158 (1979)"

最高到達温度の推定 (2)

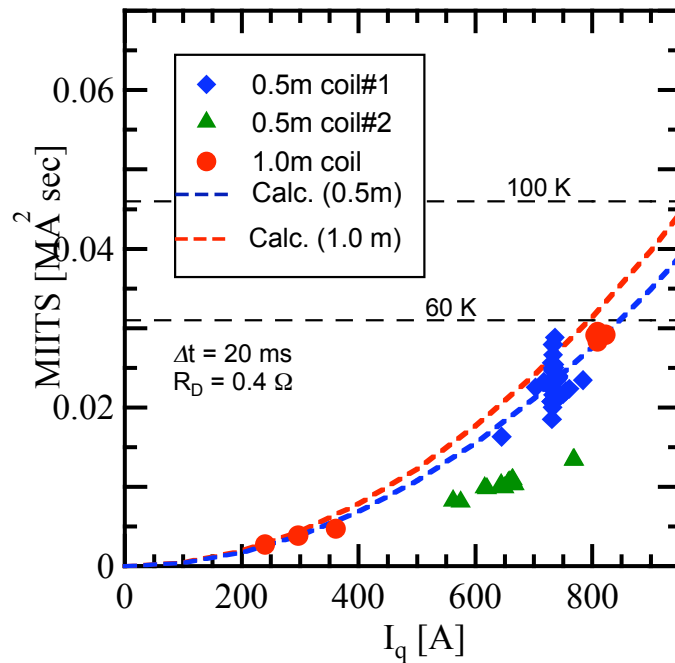


Fig. 10 最高到達温度の推定

- コイルの個体差によってMIITSは変動する (No. 1>No. 2)
- クエンチ検出器や励磁速度によってもMIITSは変動する
- 全て試験においてホットスポットは60K以下の到達温度であった。

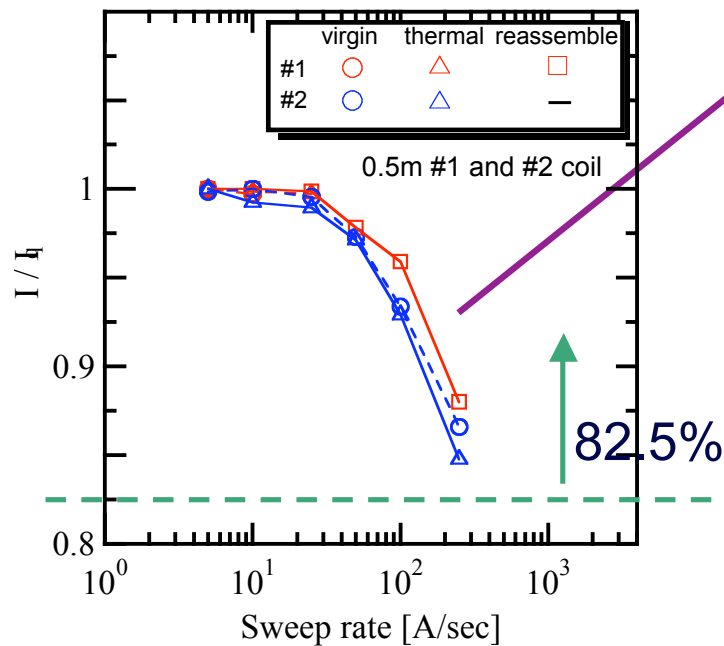


Fig. 11 励磁速度依存性

励磁速度に伴いクエンチ電流は低下

しかしNbTiに比べ減少率は小さい

Nb₃Snコイルは励磁速度に伴うクエンチ電流の低下が少ない可能性あり

- 励磁速度に関わらずクエンチ発生点は同じ
 - ・ 励磁速度を上げた場合でもコイルの劣化した部分でクエンチが起きていると考えられる

パッキングファクターの最適化

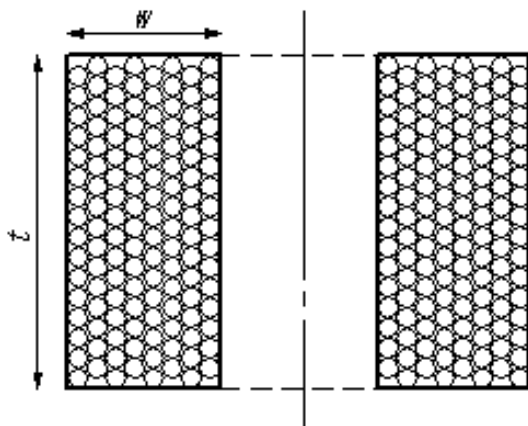


Fig. 12 仮想した矩形コイル断面図

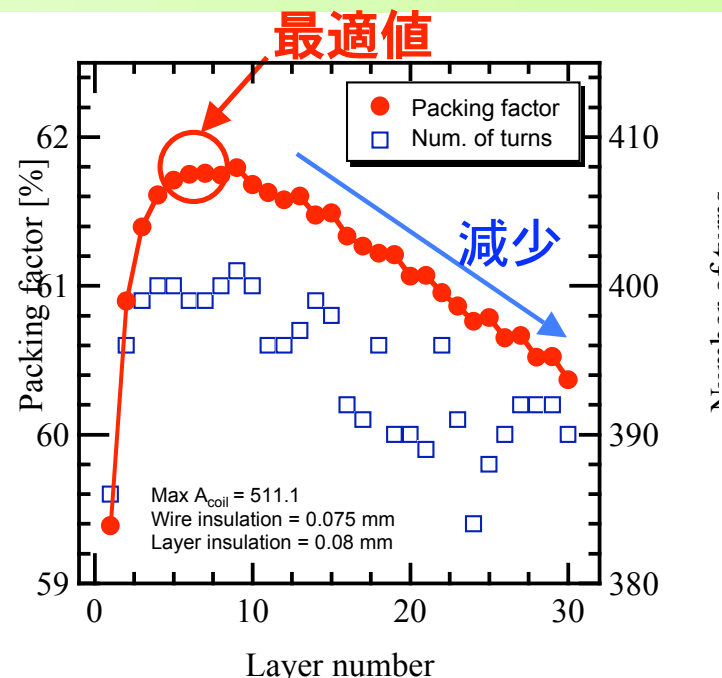
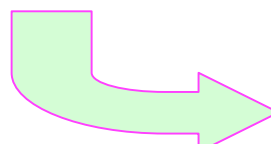


Fig. 13 一定断面積矩形コイルのパッキングファクター

■ コイル電流密度の向上

- ・ コイル電流密度を向上させる為に、パッキングファクター（充填率）を上げる必要がある。
- ・ 断面積を一定とし、層数（w）と巻き数の関係を計算



最適値が存在



- 中性子ビーム収束用六極磁石の個体差による比較を行うため、2個の0.5mのNb₃Sn鞍型コイルの励磁試験を行った
- クエンチ発生箇所は主にコイルの内層部
- 個体差によりクエンチ電流とMIITSが変動するが、最高到達温度は60K以下
- Nb₃SnコイルはNbTiよりも励磁速度を上昇させてもクエンチ電流が低下しない
- 最適なパッキングファクターを設定することで電流密度の向上を期待