

# Nb<sub>3</sub>Sn 超伝導線材の歪効果技術の進展

西 島 元\*

## 1. はじめに

Nb<sub>3</sub>Sn の超伝導は Matthias によって1954年に発見された<sup>(1)</sup>。この金属間化合物は A15 型と呼ばれる立方晶で、硬くて脆い。この「使えない」材料が「使える」材料となったきっかけは、1970年の太刀川らによるブロンズ法<sup>(2)</sup>適用の成功である。その後の研究開発により Nb<sub>3</sub>Sn 線材の特性は向上し、現在では 10 T 以上の強磁場超伝導マグネットに不可欠な材料となっている。特に、現在、フランスのカダラッシュで建設が進められている ITER(国際熱核融合実験炉)<sup>(3)</sup>では、これまでに最大でも全世界で年間26トン程度しか製造されてこなかった Nb<sub>3</sub>Sn 線材を、約600トン必要とする<sup>(4)</sup>。このことは、ITER が Nb<sub>3</sub>Sn 線材製造・評価技術を大きく進化させるであろうことを意味する。

一方、Nb<sub>3</sub>Sn の超伝導特性は歪に敏感で、僅かな歪によって顕著に変化する。このことは、Nb<sub>3</sub>Sn 線に歪を与えると容易に劣化する可能性があることを意味する。磁場中に電流の流れている電線を置くと電磁力(ローレンツ力)が働く。つまり、励磁中(磁場発生中)の超伝導コイル巻線には電磁力が作用する。この電磁力が Nb<sub>3</sub>Sn 線の特性に影響を与える。これが Nb<sub>3</sub>Sn 線材の歪効果研究のモチベーションである。

本稿では Nb<sub>3</sub>Sn 超伝導線材における歪効果について述べ、筆者らのグループによって見出された「事前曲げ効果」と、その応用技術を紹介する。

## 2. Nb<sub>3</sub>Sn における歪効果

一般的な Nb<sub>3</sub>Sn 超伝導線は、図 1 に示すように、銅マトリクス中に Nb<sub>3</sub>Sn フィラメントが多数埋め込まれた複合多芯線である。これに軸方向(紙面垂直方向)の引張り応力を印

加した状態で臨界電流( $I_c$ )を測定すると、 $I_c$ の歪依存性は図 2 のようなピーク効果を示す<sup>(5)</sup>。

$I_c$ が歪  $\epsilon_m$ において最大値  $I_{cm}$ をとるこの効果は、定性的

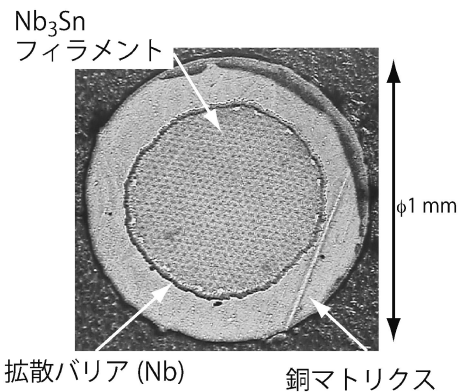


図 1 一般的な Nb<sub>3</sub>Sn 超伝導線の断面<sup>(5)</sup>。

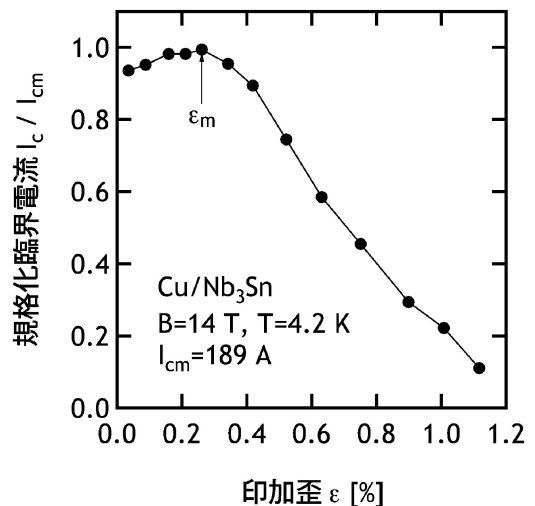


図 2 Nb<sub>3</sub>Sn 超伝導線材における臨界電流の歪依存性<sup>(5)</sup>。

\* 物質・材料研究機構 超伝導材料センター主任研究員(〒305-0047 つくば市千現 1-2-1)  
 Advances in Strain Effect Technology for Nb<sub>3</sub>Sn Superconducting Wire; Gen Nishijima (Superconducting Materials Center, National Institute for Materials Science, Tsukuba)  
 Keywords: Nb<sub>3</sub>Sn, high-strength, superconducting wire, strain effect, bending strain, critical current, superconducting property, superconducting coil  
 2010年8月11日受理

には次のように説明される。Nb<sub>3</sub>Snを拡散反応によって生成するために行う約950 Kでの熱処理の後、室温、さらには4.2 Kまで冷却すると、各構成材はそれぞれの熱膨張係数に従って熱収縮する。しかし、線材最外層のCuの熱収縮率はNb<sub>3</sub>Snのその約2倍なので<sup>(5)</sup>、熱収縮によってCuには引張り、Nb<sub>3</sub>Snには圧縮の残留歪が残る<sup>(6)</sup>。つまり、図2におけるε=0は、Nb<sub>3</sub>Snの圧縮残留歪によってI<sub>c</sub>が低下している状態であり、引張り歪印加によってNb<sub>3</sub>Snの圧縮歪が緩和し、I<sub>c</sub>が増加していく(ε ≤ ε<sub>m</sub>)。印加歪がε<sub>m</sub>を超えると(ε ≥ ε<sub>m</sub>)、Nb<sub>3</sub>Snの歪も引張り歪となり、I<sub>c</sub>は再び低下する。

この歪効果は1980年にEkinによってスケージングされ<sup>(7)</sup>、そのスケージング則は現在でも良く用いられている。さらに、最近では大きな歪領域の記述や歪の3次元性を考慮する要請から、いくつかのグループによって新たなモデルも提案され、詳細な研究が続けられている<sup>(8)-(12)</sup>。

### 3. ブロンズ法 Nb<sub>3</sub>Sn 線における事前曲げ効果

2003年、筆者らはブロンズ法 Nb<sub>3</sub>Sn 超伝導線における事前曲げ効果を見出した<sup>(13)</sup>。超伝導生成熱処理後のブロンズ法 Nb<sub>3</sub>Sn 超伝導線に室温で繰り返し曲げを印加する(事前曲

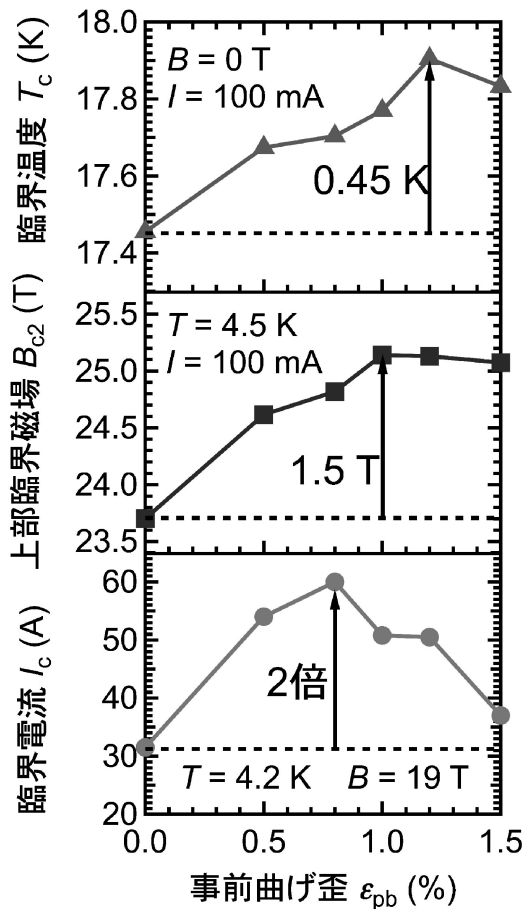


図3 高強度 Nb<sub>3</sub>Sn 超伝導線材における事前曲げ効果による特性向上<sup>(13)</sup>。

げ処理)と臨界電流、上部臨界磁場、臨界温度といった超伝導特性が向上する(図3)。本章ではこの効果の発見の経緯について紹介する。

筆者らのグループでは、液体ヘリウムを用いない無冷媒超伝導マグネットの開発に取り組んで来た。無冷媒超伝導マグネットでは、コイルは小型冷凍機による熱伝導で冷却されるので、高効率化のために可能な限りのコンパクト化が求められる。しかし、一方でコイルの電磁力支持のために補強巻線が必要な場合があり、このためにコイルサイズ、重量ともに増加してしまうと、コンパクト化とは相容れない。

そこで、筆者らのグループでは、Nb<sub>3</sub>Sn 超伝導線材そのものの強度を高めることで、外部からの補強を不要にし、コンパクトなコイルを目指し、高強度 Nb<sub>3</sub>Sn 線材の開発に取り組んで来た。これまでに CuNb 補強、Cu-NbTi 補強、Ta 繊維補強といった高強度 Nb<sub>3</sub>Sn 線材が開発された<sup>(5)(14)(15)</sup>。このうち、CuNb 補強 Nb<sub>3</sub>Sn 線材の断面を図4に示す。Nb<sub>3</sub>Sn フィラメント束の周囲に CuNb を配置することで補強とし、高強度化されている。

一方、筆者らはリアクト・アンド・ワインド(R&W: react and wind)法によるコイル開発にも取り組んでいた。通常、Nb<sub>3</sub>Sn コイルはワインド・アンド・リアクト(W&R: wind and react)法、つまり、巻線後に熱処理する方法で製作される。この方法では、より大型のコイル熱処理のために、より大型の熱処理炉が必要となる。さらにエポキシ樹脂含浸のために、真空含浸炉も必要となる。しかし、R&W法の場合は適当なサイズのドラムに巻いた状態で線材を熱処理した後にコイル巻線する。従って、巨大な熱処理炉が不要となり、コスト低減に繋がる。さらに、巻線時にエポキシ樹脂を刷毛で塗布すれば、真空含浸炉も不要である。

熱処理後の Nb<sub>3</sub>Sn 線を巻線すると Nb<sub>3</sub>Sn に曲げ歪が印加されることになる。しかも、いくつかのプーリを経て巻枠に巻線する間に、曲げを繰り返すことになる。そこで、Nb<sub>3</sub>Sn 線材の特性に与える繰り返し曲げ歪の影響を調べたことが、事前曲げ効果の発見に繋がった。

CuNb 補強 Nb<sub>3</sub>Sn 線材に事前曲げ処理を施すと、図5に示すように I<sub>c</sub> の歪依存性が大きく変化する。I<sub>c</sub> が最大値をとる歪 ε<sub>m</sub> が低歪側にシフトし、I<sub>c</sub> の最大値 I<sub>cm</sub> も向上する。

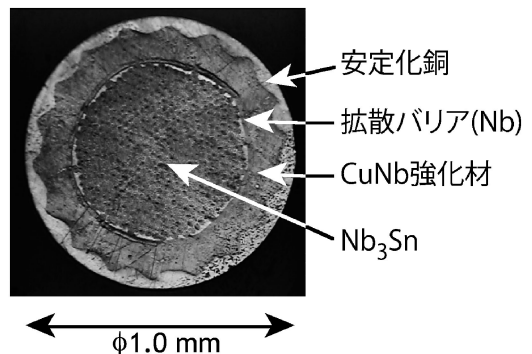


図4 高強度 Nb<sub>3</sub>Sn 超伝導線材の断面。

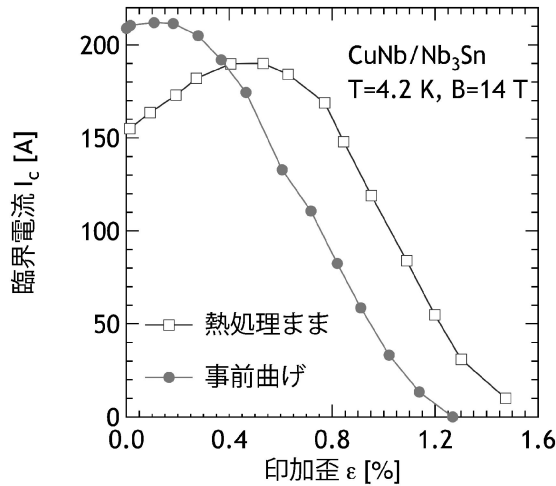


図5 熱処理ままおよび事前曲げ処理後の高強度 Nb<sub>3</sub>Sn 超伝導線材における臨界電流の歪依存性.

$\epsilon_m$  が小さくなることから、繰り返し曲げ歪印加によって Nb<sub>3</sub>Sn の圧縮歪が緩和されていることが推察される。

しかし、これだけでは事前曲げ効果全体を説明できない。I<sub>cm</sub> の変化を説明するためには、軸方向以外の歪成分、すなわち径方向と周方向の歪を考慮する必要があることがわかってきた。このことは中性子回折による残留歪測定によっても明らかとなっている<sup>(16)</sup>。

#### 4. 事前曲げ効果の応用

事前曲げ効果の応用として筆者らが着目したのは、前章で触れた R&W 法である。この R&W 法に事前曲げ効果を組み合わせれば、低コストで高特性的な Nb<sub>3</sub>Sn 超伝導コイル製作が可能となる。

この「事前曲げ R&W 法」を図 6 に示す。プリーを 10 個使って繰り返し曲げを行った後に巻き枠に巻線する。このとき、プリーの大きさを変えることで、事前曲げ歪の大きさも制御できる。エポキシ樹脂は巻線時に刷毛で塗布される。

最初の実証として、事前曲げ R&W 法による単層コイルを製作した。コイルの写真を図 7 に示す。直径 200 mm の巻き枠に、事前曲げ歪値を 0, 0.5, 0.8, 1.0% の 4 種類変化した線材をそれぞれ巻線した。諸元を表 1 にまとめる。

これらのコイルを 11 T の磁場中で通電した結果が図 8 である。このとき線材には、電磁力が巻き枠に押し付けられる方向になるように通電した。これは、電磁力の影響を無視するためである。4 個のコイルともに、短尺試料に比べて顕著に高い臨界電流を示し、事前曲げ R&W 法による臨界電流向上効果を実証した<sup>(17)(18)</sup>。

さらに、R&W 法によるコイル巻線過程で発生しうる曲げ歪の影響を検証するために、事前曲げ歪は 0.8% に固定し、コイル巻き枠直径をパラメータとしてコイルを製作した。表 2 に示すように巻き枠直径を 200, 125, 100, 83 mm とした。これは曲げ歪にして 0.5, 0.8, 1.0, 1.2% に相当する。コイル写

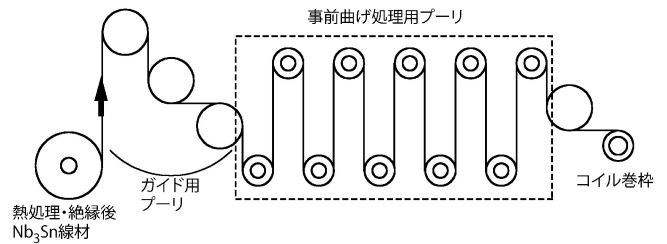


図 6 事前曲げ R&W 法.

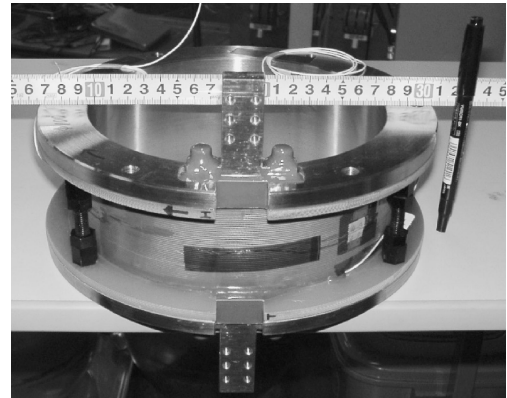


図 7 単層テストコイル外観.

表 1 単層テストコイル諸元.

	Coil#1	Coil#2	Coil#3	Coil#4
事前曲げ歪 [%]	1.0	0.8	0.5	0
事前曲げプリー直径 [mm]	100	125	200	—
巻き枠直径 [mm]	200			
コイル高さ [mm]	54.5			
ターン数	49	49	48	49
巻線張力 [MPa]	31~37			

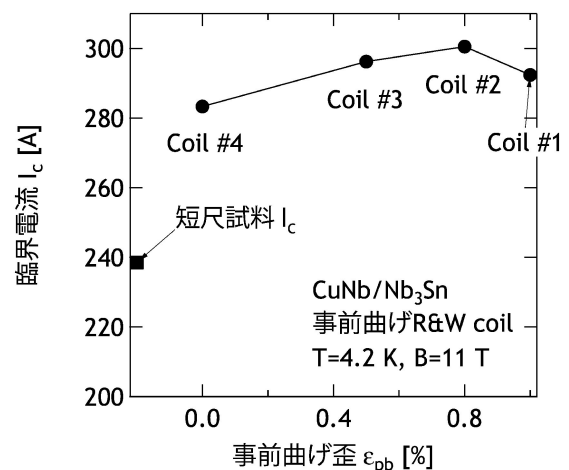


図 8 事前曲げ R&W 法による単層テストコイルの実験結果.

真を図 9 に示す。

これらのコイルを 8 T の磁場中で通電した結果を図 10 に示す。この実験でも、電磁力の影響を無視できる方向に通電

表2 曲げ影響調査用単層テストコイル諸元.

	Coil#1	Coil#2	Coil#3	Coil#4
事前曲げ歪 [%]		0.8		
事前曲げプーリ直径 [mm]		125		
巻棒直径 [mm]	200	125	100	83
曲げ歪 [%]	0.5	0.8	1.0	1.2
ターン数	10	10	10	10
Number of layer		1		
巻線張力 [MPa]		31~37		

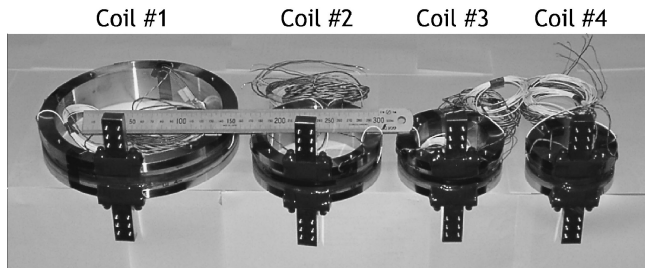


図9 曲げ影響調査用単層テストコイル外観.

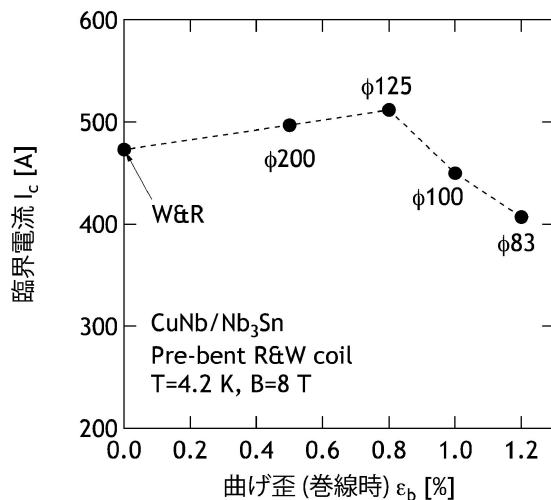


図10 事前曲げ R&W 法における巻線時曲げ歪の影響.

している. 0.8%曲げ歪までは, 事前曲げによる臨界電流向上効果が顕著であることがわかる. つまり, 0.8%事前曲げを与えることで, 0.8%曲げに相当する小径(125 mm)コイルに巻線しても臨界電流向上効果が現れるということが示された<sup>(19)</sup>.

以上の2回の実験結果を受けて, 最終的な実証コイルを製作した. 実証コイルの写真を図11に示す. コイルは100 A通電で1.1 T発生する設計であり, インダクタンスは0.4 Hである. コイルの諸元は表3に示す.

図12に実証コイルの励磁試験結果を示す. 試験は14, 12, 10 Tの磁場中において, 実証コイル全体に通電した場合と, 外側コイルのみに通電した場合の2通り行った. コイル全体に通電した場合のロードライン(通電電流と最大経験磁場の関係を示す直線)を実線で, 外側コイルのみに通電し

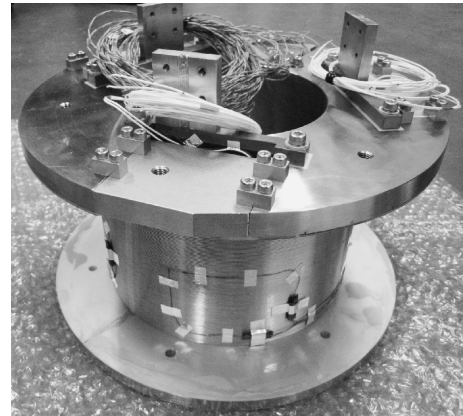


図11 事前曲げ R&W 法による実証コイル外観.

表3 事前曲げ R & W 法実証コイル諸元.

CuNb/Nb <sub>3</sub> Sn 線直径	1 mm
絶縁	25 μm ポリイミドテープ
絶縁後線径	1.1 mm
巻線内径	150 mm
巻線外径	180 mm
コイル高さ	132 mm
巻き層数	16層
総ターン数	1815ターン
外周補強巻線	SUS線(6層, 759ターン)

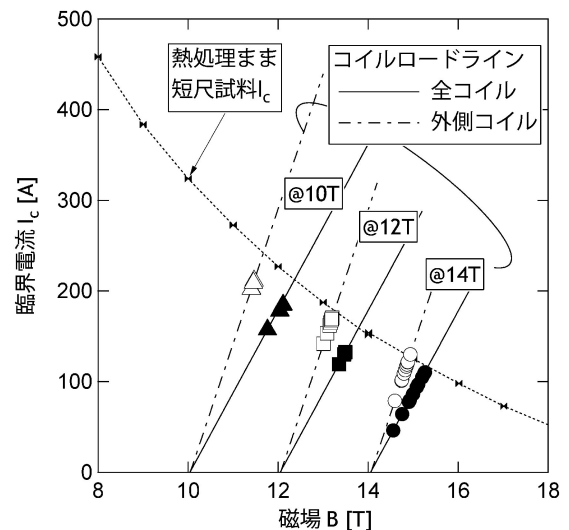


図12 事前曲げ R&W 法による実証コイル励磁試験結果.

た場合のロードラインを一点鎖線で示した. コイル全体を14 Tの磁場中で通電した結果, 約10回のトレーニング(クエンチを繰り返す毎に電流値が上昇していく現象)を経て, 110 Aまで通電できた. これは短尺試料の臨界電流に対して96%である. このときのクエンチは全て内側コイルから発生していた. それは, 電磁力によりコイル巻線が動き(機械的擾乱と呼ばれる), クエンチしたと考えられる. 一方, 外側コイルのみに通電したところ, 130 Aまで通電できた. こ

れは短尺試料臨界電流の103.5%である。つまり、機械的擾乱を抑制することで、短尺試料臨界電流を超える電流値まで通電できることがわかった。12 T, 10 Tと磁場が低くなると、コイルクエンチ電流は短尺試料臨界電流に達していないが、これは電磁力によって生じる歪がコイル臨界電流を減少させていることに加え、機械的擾乱の影響も無視できないと考えられる。事前曲げ効果は、高磁場において顕著になる。それは、高磁場ほど臨界電流の歪依存性が顕著になるためである。このことは、さらに高磁場で用いると、より顕著な通電電流向上効果が期待できることを意味する。すなわち、実際にNb<sub>3</sub>Sn線材を用いようとする磁場領域においては、事前曲げR&W法によって低コストで高特性を得ることが期待できる<sup>(20)</sup>。

## 5. まとめ

本稿ではNb<sub>3</sub>Snの歪効果応用技術としての事前曲げ効果を紹介し、これまでに得られた結果をもとに、メカニズムから応用までを俯瞰した。Nb<sub>3</sub>Sn超伝導体が発見されて半世紀が経過した。この間にNb<sub>3</sub>Snは工業製品となり、多くのNb<sub>3</sub>Sn超伝導機器が開発され、運転されてきた。しかし、Nb<sub>3</sub>Snの歪効果には未知の部分があり、今でも研究が続けられている。また、最近では新しい製造方法も開発されており、まさに「古くて新しい」材料であると言える。

新たな超伝導マグネット材料として、Bi系やY系といった酸化物系超伝導線材の応用が進められているが、まだ長尺特性や安定性の面で開発要素が多い。まずは既存技術としてのNb<sub>3</sub>Snの特性を十分に理解し、効率良く用いることが、強磁場マグネット開発の鍵であることは間違いない。

本研究は筆者が東北大学金属材料研究所在職中に行われました。共同研究者の黒英俊博士(茨城大学, 現東北大学), 淡路智准教授, 渡辺和雄教授(東北大学), 片桐一宗教授(岩手大学), 三好一富氏, 坪内宏和氏(古河電工)に感謝いたします。

## 文 献

(1) B. T. Matthias, T. H. Geballe, S. Geller and E. Corenzwit:

Phys. Rev., **95**(1954), 1435.  
(2) K. Tachikawa: Proc. ICMC-3, (1970), 339.  
(3) <http://www.iter.org/>  
(4) P. Mocaer, G. Grunblatt, C. Verwaerde and C. Kohler: IEEE Trans. Appl. Supercond. **15** (2005), 3516-3519.  
(5) D. S. Easton, D. M. Kroeger, W. Specking and C. C. Koch: J. Appl. Phys., **51**(1980), 2748-2757.  
(6) 実際にはCuの降伏を考慮する必要がある。例えばJ. Ekin, N. Cheggour, M. Abrecht, C. Clickner, M. Field, S. Hong, J. Parrell and Y. Zhang: IEEE Trans. Appl. Supercond., **15** (2005), 3560-3563.  
(7) J. Ekin: Cryogenics, **20**(1980), 611-624.  
(8) D. M. J. Taylor and D. P. Hampshire: Supercond. Sci. Technol., **18**(2005), S241-S252.  
(9) A. Godeke, B. ten Haken and H. H. J. ten Kate: Physica C, **372-376**(2002), 1295-1298.  
(10) W. D. Markiewicz: Cryogenics, **44**(2004), 767-782.  
(11) H. Oguro, S. Awaji, G. Nishijima and K. Watanabe: IEEE Trans. Appl. Supercond., **20**(2010), 1424-1427.  
(12) J. W. Ekin: Supercond. Sci. Technol., **23**(2010), 083001.  
(13) 黒英俊, 西島元, 淡路智, 渡辺和雄: 低温工学, **39**(2004), 422-426.  
(14) K. Miyoshi, S. Endoh, S. Meguro, G. Nishijima, S. Awaji and K. Watanabe: IEEE Trans. Appl. Supercond., **14**(2004), 1004-1007.  
(15) G. Iwaki, G. Nishijima, M. Takahashi, K. Katagiri and K. Watanabe: IEEE Trans. Appl. Supercond., **16**(2006), 1261-1264.  
(16) H. Oguro, S. Awaji, G. Nishijima, P. Badica, K. Watanabe, F. Shikanai, T. Kamiyama and K. Katagiri: J. Appl. Phys., **101**(2007), 103913.  
(17) H. Oguro, G. Nishijima, S. Awaji, K. Miyoshi, S. Meguro and K. Watanabe: IEEE Trans. Appl. Supercond., **16**(2006), 1237-1240.  
(18) G. Nishijima, H. Oguro, S. Awaji, K. Katagiri, K. Miyoshi, S. Meguro and K. Watanabe: Supercond. Sci. Technol., **18**(2005), S261-S265.  
(19) G. Nishijima: presented at MEM06, Durham University, U. K., (2006).  
(20) G. Nishijima, H. Oguro, S. Awaji, K. Watanabe, H. Tsubouchi, Y. Mikami and T. Kiyoshi: Supercond. Sci. Technol., **21**(2008), 054012.



西島元

★★  
1998年3月 東京工業大学大学院総合理工学研究科創造エネルギー専攻博士後期課程修了  
1998年4月-2000年11月 日本原子力研究所那珂研究所博士研究員  
2000年12月-2010年4月 東北大学金属材料研究所研究機関研究員, 助手を経て助教  
2010年5月- 現職  
専門分野: 応用超伝導工学, 実用超伝導線の材料力学  
◎実用超伝導線を用いた強磁場マグネット, 大電流導体の開発に従事。機械特性評価を中心に活動。  
★★