研究論文

パウダー・イン・チューブ法 MgB₂ テープ線材における歪効果—*in situ* 法および *ex situ* 法テープの比較—北口 仁[†], 熊倉 浩明The Strain Effects in PIT *in situ* and *ex situ* MgB₂ TapesHitoshi KITAGUCHI[†] and Hiroaki KUMAKURA

Synopsis: We investigate the influence of lengthwise mechanical strain on the critical current (I_c), the strain effects, for three kinds of “powder-in-tube (PIT)” route MgB₂ conductors. We tested *in situ* moncore MgB₂/iron, *ex situ* moncore MgB₂/stainless steel, and *ex situ* 14-filament MgB₂/nickel tapes. I_c was measured for each sample as a function of lengthwise external strain in magnetic fields (B) at 4.2, 15, 20, and 25K using a U-shaped rig made of stainless steel. Even though the fabrication process and conductor configuration (number of filaments, width, and thickness) are different, the I_c -strain relations were essentially the same in all MgB₂ samples. By increasing the strain, large and irreversible degradation occurred after linear and reversible I_c -strain relation up to the maximum of I_c (I_{cm}). The slope of linear I_c -strain relation in the reversible regime, $d(I_c/I_{cm})/d(\text{strain})$, depends on both temperature and magnetic field. We discuss the relations between $d(I_c/I_{cm})/d(\text{strain})$ and magnetic fields normalized by the irreversibility field (B_{irr}). We also examined the strain effect of *ex situ* PIT moncore in Nb₃Sn/stainless steel tape. The I_c -strain relation obtained is a parabolic one that has been reported so far for many kinds of multifilamentary Nb₃Sn conductors. This indicates that the linear strain dependence of I_c in MgB₂ conductors is an essential feature of MgB₂.

Keywords: strain effect, magnesium diboride (MgB₂), critical current (I_c), irreversibility field (B_{irr})

1. はじめに

MgB₂ 化合物¹⁾は従来の金属系超伝導材料に比べて高い臨界温度(T_c)を有しつつも、高温超伝導材料に比べて単純な結晶構造であることや単一相の合成に困難が少ない。これは、実用材料、特に線材を作製する上で大きな利点となる。超伝導線材の実用化に当たって重要な課題の一つとして、耐歪特性の向上が挙げられる。また、応用機器の設計にあたっては、冷却による熱的歪や電磁力に起因する歪の影響を考慮する必要がある。以上のように、超伝導線材において、歪と特性の関係（いわゆる、歪効果）に係わる情報・知見は重要である。著者らは、系統的な基礎的知見を得るため、単一試料を用い、引張から圧縮に至る歪の影響を評価する方法として U 字型バネ治具を用いる試験法^{2,3)}を確立してきた。また、その試験法を用いて *ex situ* 法 MgB₂/ステンレス鋼(SUS310)テープ線材についての歪効果

を評価、報告³⁾した。本研究では、MgB₂ 線材の歪効果についての更なる情報・知見を得ることを目的とし、U 字型バネ治具による試験法を用いて種々の MgB₂ テープ線材、*in situ* 法 MgB₂/Fe、*ex situ* 法 MgB₂/SUS、*ex situ* 法 MgB₂/Ni テープ線材における歪効果を評価した。また比較のために *ex situ* 法 Nb₃Sn テープ線材についても試験を行った。本報では、それらの試験結果、特に臨界電流(I_c)と外的歪の相関について報告する。

2. 実験方法

U 字型バネ治具を用いる歪効果試験法は ten Haken ら⁴⁾によって考案された。本研究で用いた試験法の詳細については既に報告⁵⁾しているので、ここでは簡略に要点のみを記述する。ステンレス鋼(SUS304)製 U 字型バネ治具にテープ線材試料片面を半田付けによって固定した。その際には、ステンレス鋼用の半田及びフラックス材を使用した。これによって、試料は U 字型バネ治具と一体になって変形する。U 字型バネ治具両端の間隔（ピッチ）を変化させることで、圧縮から引張の広い領域にわたって試料長手方向に一軸歪に近似できる歪を系統的に制御して再現性良く

Received September 27, 2005

独立行政法人物質・材料研究機構

〒305-0047 茨城県つくば市千現 1-2-1

National Institute for Materials Science, 1-2-1 Sengen, Tsukuba, Ibaraki 305-0047, Japan

[†] E-mail: KITAGUCHI.Hitoshi@nims.go.jp

Table 1 Specification of tested samples

Sample*	Width (mm)	Thickness (mm)	Heat treatment or Annealing	Remarks
<i>in situ</i> MgB ₂ /Fe	4.0	0.55	600°C 1h	Monocore, MgH ₂ + amorphous B
<i>ex situ</i> MgB ₂ /SUS316	2.8	0.62	No	Monocore
<i>ex situ</i> MgB ₂ /Ni**	3.6	0.65	900°C	14 filaments, Cu-stabilizer with Nb barrier
<i>ex situ</i> Nb ₃ Sn/SUS316	4.0	0.55	No	Monocore

* All the samples were fabricated through the “powder-in-tube (PIT)” process.

** *ex situ* MgB₂/Ni tape was produced by Columbus Superconductors, Genova, Italy.

発生させることが可能である。U字型バネ治具を装着した測定プローブをヘリウムガス冷却型の温度可変クライオスタット中に設置し、ヘリウムガス冷却による温度制御あるいは液体ヘリウム中で評価試験を行った。試料に印加する外部歪は、SUS製U字型バネ治具上で測定温度まで冷却した状態をゼロと定義する。また、測定温度範囲は4.2-25 Kの範囲であり加工温度(室温~900°C)に比べて極めて狭い範囲であることから、測定温度範囲内での熱的歪の違いについては無視した。外部磁場は試料テープ面に垂直方向に印加した。 I_c は直流四端子法により、1 μ V/cmの電界基準を用いて決定した。電流及び電圧リード線はU字型バネ治具に接しない試料表面に直接半田で接続した。この接続には一般の錫鉛共晶半田を使用した。また、 I_c の磁場依存性(あるいは、その外挿)から $I_c = 0.1$ Aを基準として不可逆磁場(B_{irr})を決定した。

試料としては金属管粉末充填法(Powder in Tube, PIT法)で作製した3種のMgB₂テープ線材、*in situ*法MgB₂/Fe⁵⁾、*ex situ*法MgB₂/SUS⁶⁾、*ex situ*法MgB₂/Ni⁷⁾テープ線材を準備した。また、比較のために同様にPIT法を用いて、*ex situ*法Nb₃Sn/SUSテープ線材⁸⁾を準備した。各試料の緒元についてはTable 1にまとめて示す。

3. 結果及び考察

3.1 *in situ*法MgB₂/Feテープ線材

*in situ*法MgB₂/Feテープ線材の I_c と外部歪の関係をFig. 1に示す。 I_c は、歪の増加と共に直線的に増加し、最大値(I_{cm})を経た後、急激に低下する。また、 I_c と外部歪の間に直線関係が得られる領域では、 I_c と外部歪の関係は可逆的である。(以下、この領域を可逆的領域と記す。)以上のような I_c の歪依存性は、*ex situ*法MgB₂/SUSテープ線材で報告したもの³⁾と全く同様の傾向である。

試料はMgB₂と金属シース材(ここでは純鉄)の複合材料であり、測定温度までの熱履歴により各部に熱的な内部歪(内部応力)が発生していると考えられる。ここでは、 I_{cm} を与える外部歪の状態においてMgB₂部分の内部歪(intrinsic strain)がゼロになっていると考える。また、 I_{cm} を与える外

Fig. 1 I_c -strain relation for PIT *in situ* MgB₂/Fe tape at 4.2 K, 7 T.

Fig. 2 I_c/I_{cm} vs. intrinsic strain plot for PIT *in situ* MgB₂/Fe tape. I_{cm} is the maximum I_c in each field. The intrinsic strain becomes zero at I_{cm} in each field.

Fig. 3 $d(I_c/I_{cm})/d(\text{strain})$ vs. B at 4.2, 15, 20, and 25 K for PIT *in situ* MgB_2/Fe tape.

部歪は磁場に依存しない。Fig. 2 に、種々の磁場(6.5-7.5 T)について、各磁場での I_{cm} で規格化した $I_c(I_c/I_{cm})$ (以下、 I_c/I_{cm} を規格化 I_c と記す。)と内部歪の関係を可逆的領域について示す。磁場の増加に伴って直線的な I_c の歪依存性における傾きが大きくなる、すなわち、磁場の増加によって I_c の変化が歪に対して敏感になることがわかる。この直線的な I_c の歪依存性における傾き ($d(I_c/I_{cm})/d(\text{strain})$ 、以下 $d(I_c/I_{cm})/d(\text{strain})$ を歪依存性の傾きと記す。)と磁場の関係を、4.2 K、15 K、20 K、及び、25 K について Fig. 3 に示す。各温度において歪依存性の傾きは磁場の増加に対して直線的に増加する傾向が見られる。また、温度の上昇に伴って歪依存性の傾きは増大する、すなわち、温度の

Fig. 4 I_c/I_{cm} vs. intrinsic strain relations for PIT *ex situ* MgB_2/SUS tape at 4.2 K.

Fig. 5 $d(I_c/I_{cm})/d(\text{strain})$ vs. B at 4.2, 15, and 20 K for PIT *ex situ* MgB_2/SUS tape.

上昇によって I_c の変化が歪に対して敏感になることがわかる。

MgB_2 線材における歪依存性については、定性的には同様の傾向が、U 字型バネ治具法 (本研究と同じ手法)^{3,9,10)}、コイルスプリング型治具法¹¹⁾や引張試験型一軸歪法¹²⁾を用いた結果として数多く報告されており、 MgB_2 線材の一般的な性質と考えられる。一部に引張試験型一軸歪法による結果として I_c が歪にほとんど依存しない (あるいは I_c の歪依存性が極めて小さい) 場合¹³⁾や曲げ歪法¹⁴⁾を用いた場合の異なる挙動が報告されている。前者の引張試験型一軸歪法に結果については、4.2 K、2 T と低磁場での結果であること及び本研究の結果を外挿すると低磁場では I_c の歪依存性が小さくなることが予想されることを考えると、 I_c の歪依存性が極めて小さい事は本研究の結果と矛盾するものではない。また、曲げ歪法の場合は試料内部で引張から圧縮にわたる歪の分布が生じていることが異なる挙動を示す原因であると予想される。

3.2 *ex situ* 法 MgB_2/SUS テープ線材

ex situ 法 MgB_2/SUS テープ線材の 4.2 K における I_c と外部歪の関係については既に報告³⁾しているように、3.1 項で述べた *in situ* 法 MgB_2/Fe テープ線材のものと定性的には同様の傾向である。本研究では、*in situ* 法 MgB_2/Fe テープ線材と比較するために、規格化 I_c と内部歪の関係の磁場依存性及び温度依存性を検討した。Fig. 4 に 4.2 K における規格化 I_c と内部歪の関係を、4.2 K、15 K、及び、20 K における歪依存性の傾きと磁場の関係を Fig. 5 にそれぞれ示す。*in situ* 法 MgB_2/Fe テープ線材の場合と磁場及び温度依存性は定性的には同様であり、磁場あるいは温度の増加に伴って歪依存性の傾きは増加する傾向にある。すなわち、磁場あるいは温度の上昇によって I_c の変化が歪に対して敏感になることがわかる。

3.3 *ex situ*法 MgB₂/Ni テープ線材

ex situ 法 MgB₂/Ni テープ線材の特性と歪効果については既に詳細に報告⁹⁾している。*ex situ* 法 MgB₂/Ni テープ線材における I_c と歪の関係は、定性的には、3.1 項で述べた *in situ* 法 MgB₂/Fe テープ線材のもの及び 3.2 項で述べた *ex situ* 法 MgB₂/SUS テープ線材のものと全く同様の傾向である。*ex situ* 法 MgB₂/Ni テープ線材は 14 芯の多芯線材であり、MgB₂ フィラメントの寸法等は他二者の単芯（モノコア）テープ線材とは大きく異なる。また、金属シース材質（Ni あるいは SUS）、プロセス（*ex situ* あるいは *in situ*）、及び、熱履歴（900°C、600°C、あるいは、冷間加工のみ）も異なっている。このような差違にもかかわらず三種の MgB₂ テープ線材で同様の歪依存性が観測されたことは、可逆的領域における直線的な I_c と歪の関係が MgB₂ テープ線材において本質的な性質であることを示唆している。

3.4 *ex situ*法 Nb₃Sn/SUS テープ線材

MgB₂ 線材の歪効果と比較するために、Nb₃Sn 粉末を用いて MgB₂ テープ線材試料と同様 PIT 法で作製した *ex situ* 法 Nb₃Sn/SUS テープ線材についての歪効果を評価した。規格化 I_c と外部歪の関係を図 6 に示す。Nb₃Sn/SUS テープ線材については、Nb₃Sn 線材について従来から報告^{15,16)}されているような放物線状の I_c の歪依存性が得られた。狭い範囲に限ると直線近似が可能とも思われるが、MgB₂ 線材で見られる広い歪範囲での直線的な挙動とは異なっている。このことから、MgB₂ 線材で見られる広い歪範囲での直線的な I_c の歪依存性は MgB₂ 自身の有する特性に起因するものであると判断される。これは、 B_{c2} の歪依存性が Nb₃Sn 線材では放物線的¹⁵⁾であり、MgB₂ 線材では直線的¹⁷⁾であ

Fig. 6 I_c/I_{cm} vs. strain relations for PIT *ex situ* Nb₃Sn/SUS tape at 4.2 K.

Fig. 7 $d(I_c/I_{cm})/d(\text{strain})$ vs. B plot for PIT MgB₂ tapes. Each label for the symbols represents (*in situ* or *ex situ*)/(sheath material)/temperature.

Fig. 8 $d(I_c/I_{cm})/d(\text{strain})$ vs. B/B_{irr} plot for the all MgB₂ samples. Each label for the symbols represents (*in situ* or *ex situ*)/(sheath material)/temperature

ることにも対応していると考えられる。

3.5 種々の MgB₂ 線材の比較

3.1 項から 3.3 項で得られた結果をまとめて、歪依存性の傾きと磁場の関係を Fig. 7 に示す。すべての試料について、歪依存性の傾きは磁場の増加に対して直線的に増加する。また、温度の上昇に伴って歪依存性の傾きは増大する傾向も共通している。しかしながら、歪依存性の傾きの値は試料によって異なっている。MgB₂ 線材の磁場、温度、歪についての I_c のスケーリングに関する Dhalles らの報告¹⁷⁾から、磁場や温度の影響は B_{irr} を考慮することでスケーリングできると考えられる。Fig. 7 の結果について、各試料、各温度の磁場を B_{irr} を用いて規格化（ B/B_{irr} 、以下規格化した磁場と記す。）した。MgB₂ 試料についての歪依存性

Table 2 Irreversibility field (B_{irr}) at 4.2-25 K

Sample	B_{irr} (T)				
	Temperature	4.2K	15K	20K	25K
<i>in situ</i> MgB ₂ /Fe		16.1	11.3	8.1	5.2
<i>ex situ</i> MgB ₂ /SUS		12.8	7.0	3.9	
<i>ex situ</i> MgB ₂ /Ni		7.9	5.8	4.6	

* B_{irr} was determined using extrapolation of each I_c - B curve with the criterion of $I_c = 0.1$ A.

の傾きと規格化した磁場の関係について、Fig. 7 と同様に全ての結果を同時にプロットしたものを Fig. 8 に示す。規格化に用いた B_{irr} は各試料の各温度における外部歪ゼロでの I_c - B 曲線を外挿して決定したものであり、まとめて Table 2 に示す。*in situ* 法 MgB₂/Fe テープ線材の 25 K (□) 及び *ex situ* 法 MgB₂/SUS テープ線材の 20 K (▼) 場合を除くと、一定のばらつきの範囲内で一致するように見られる。これは、 B_{irr} を考慮することで MgB₂ 線材の歪効果に関する統一的なスケーリングが可能であることを示唆している。詳細な検討のために各試料別に歪依存性の傾きと規格化した磁場の関係をプロットしたものを Fig. 9(a)-(c) に示す。*in situ* 法 MgB₂/Fe テープ線材 (Fig. 9(a)) では、4.2-20 K の範囲で歪依存性の傾きと規格化した磁場の関係はほぼ同一直線上にのる。これは MgB₂ 線材の歪効果に関する統一的なスケーリング則の可能性を支持するものである。25 K の場合だけ 4.2-20 K とは異なる関係となっているが、その理由については現在のところ明らかではない。一方、*ex situ* 法 MgB₂/SUS テープ線材 (Fig. 9(b)) の場合は、4.2-20 K の範囲でも、歪依存性の傾きと規格化した磁場の関係は温度によって異なったものとなっている。*ex situ* 法 MgB₂/Ni テープ線材 (Fig. 9(c)) の歪依存性の傾きと規格化した磁場の関係は、(a) 及び (b) の中間的なものであり、若干の温度依存性を示している。これらの差違の原因として、各試料の作製プロセスが異なることによる MgB₂ 結晶粒の粒間結合性の違いが考えられる。*in situ* 法 (a) と *ex situ* 法 (b, c) では *in situ* 法の法が良好な粒間結合が期待できる。また、*ex situ* 法における加工後のアニールの有無 ((b) アニールなし、(c) 900°C) も考えあわせると、MgB₂ 結晶粒の粒間結合性は (a) > (c) > (b) と推測される。Fig. 9 における温度依存性は (a) < (c) < (b) であり、推測される粒間結合性の順に対応している。しかしながら、粒間結合性以外にも MgB₂ 結晶粒毎 (あるいは結晶粒内) での特性 (T_c , B_{irr} 等) の分布も関係している可能性がある。この観点からは、MgB₂ フィラメント (あるいはコア) 内部での特性分布について研究を進める必要がある。さらに、 I_c 及び B_{irr} の決定に際して実用的な基準を使用していることに起因してばらつきが生じている可能性も考慮する必要がある。以上から、MgB₂ 線材の歪効果に関する統一的なスケーリング

Fig. 9 $d(I_c/I_{cm})/d(\text{strain})$ vs. B/B_{irr} plot for (a) *in situ* MgB₂/Fe, (b) *ex situ* MgB₂/SUS, and (c) *ex situ* MgB₂/Ni tapes.

則や歪依存性の傾きと規格化した磁場の関係における温度依存性についての詳細な議論には今後更なる研究が必要であると判断される。

4. まとめ

PIT 法で作製した *in situ* MgB₂/Fe、*ex situ* MgB₂/SUS、*ex situ* MgB₂/Ni、及び、*ex situ* Nb₃Sn テープ線材に歪効果を評価した。

MgB₂ 線材の I_c は、歪の増加と共に直線的に増加し、最大値 (I_{cm}) を経た後、急激に低下する。また、 I_c と外部歪の間の直線的関係は広い歪範囲で可逆的である。一方、Nb₃Sn 線材では、 I_c は放物線的な歪依存性を示す。MgB₂ 線材で見られる広い歪範囲での直線的な I_c と歪の関係は MgB₂ の本質的な特性であると判断される。

可逆的領域における I_c の直線的な歪依存性における傾きは磁場及び温度に依存する。 I_c の変化は磁場あるいは温度の上昇によって歪に対して敏感になる。歪依存性の傾きと B_{irr} で規格化した磁場の関係は試料の種類にかかわらず概ね一致する。しかしながら、MgB₂ 線材の歪効果に関する統一的なスケーリング則についての詳細な議論には今後更なる研究が必要である。

参 考 文 献

- 1) J. Nagamatsu, N. Nakagawa, Y. Zenitani, and J. Akimitsu: "Superconductivity at 39K in magnesium diboride," *Nature* **410** (2001) 63-64
- 2) H. Kitaguchi, H. Kumakura, K. Togano, H. Miao, T. Hasegawa, and T. Koizumi: "Adv. in Supercond XII," T. Yamashita and K. Tanabe Eds. Tokyo: Springer-Verlag (2000) 646-648
H. Kitaguchi, K. Itoh, H. Kumakura, T. Takeuchi, K. Togano, and H. Wada: "Strain effect in Bi-based oxide/Ag superconducting tapes," *IEEE Trans. Appl. Supercond* **11** (2001) 3058-3061
- 3) H. Kitaguchi, H. Kumakura, and K. Togano: "Strain Effect in MgB₂/Stainless Steel Superconducting Tape," *Physica C* **363** (2001) 198-201
H. Kitaguchi, A. Matsumoto, H. Hatakeyama, and H. Kumakura: "Critical Current of MgB₂/Stainless Steel Composite Tape under Tensile or Compressive Strain," *Supercond. Sci. Technol.* **16** (2003) 976-979
H. Kitaguchi, A. Matsumoto, H. Hatakeyama, and H. Kumakura: "V-I characteristics of MgB₂ PIT composite tapes: n-values under strain, in high fields, or at high temperatures," *Physica C* **401** (2004) 246-250
- 4) B. ten Haken, A. Godeke, and H. H. J. ten Kate: "A new device for measuring the critical current in a tape as a function of the axial and transverse strain, the magnetic field and temperature," *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **3** (1993) 1273-1276
B. ten Haken, H. H. J. ten Kate, and J. Tenbrink, "Compressive and tensile axial strain reduced critical currents in Bi-2212 conductors," *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **5** (1995) 1298-1301
B. ten Haken, A. Beuink, and H. H. J. ten Kate: "Small and repetitive axial strain reducing the critical currents in BSCCO/Ag superconductors," *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **7** (1997) 2034-2037
- 5) H. Fujii, K. Togano, and H. Kumakura: "Enhancement of critical current densities of powder-in-tube processed MgB₂ tapes by using MgH₂ as a precursor powder," *Supercond. Sci. Technol.* **15** (2002) 1571-1576
- 6) H. Kumakura, A. Matsumoto, H. Fujii, and K. Togano: "High transport critical current density obtained for powder-in-tube processed MgB₂ tapes and wires using stainless steel and Cu-Ni tubes," *Appl. Phys. Lett.* **79** (2001) 2435-2437
- 7) G. Grasso, A. Malagoli, C. Ferdeghini, S. Roncallo, V. Braccini, and A. S. Siri: "Large transport critical currents in unsintered MgB₂ superconducting tapes," *Appl. Phys. Lett.* **79** (2001) 230-232
R. Musenichi, P. Fabbicatore, S. Farinon, C. Ferdeghini, G. Grasso, M. Greco, A. Malagoli, R. Marabotto, M. Modica, D. Nardelli, A. S. Siri, M. Tassisto, and A. Tumino: "Behavior of MgB₂ react & wind coils above 10K," *IEEE Trans. Appl. Supercond.* **15** (2005) 1452-1456
- 8) H. Kumakura, H. Kitaguchi, A. Matsumoto, H. Yamada, M. Hirakawa and K. Tachikawa: "Fabrication of A15-type superconducting tape conductors by applying the ex situ powder-in-tube method," *Supercond. Sci. Technol.* **18** (2005) 147-151
- 9) H. Kitaguchi, and H. Kumakura: "Superconducting and mechanical performance and the strain effects of a multifilamentary MgB₂/Ni tape," *Supercond. Sci. Technol.* **18** (2005) S284-S289
- 10) P. Kováč, M. Dhallé, T. Melisek, H. J. N. van Eck, W. A. J. Wessel, B. ten Haken and I. Husek: "Dependence of the critical current in ex situ multi- and mono-filamentary MgB₂/Fe wires on axial tension and compression," *Supercond. Sci. Technol.* **16** (2003) 600-607
P. Kováč, T. Melisek, M. Dhallé, A. den Ouden and I. Husek: "Critical currents of MgB₂ wires prepared in situ and ex situ subjected to axial stress," *Supercond. Sci. Technol.* **18** (2005) 1374-1379
- 11) P. Lezza, V. Abächerli, N. Clayton, C. Senatore, D. Uglietti, H. L. Suo and R. Flükiger: "Transport properties and exponential n-values of Fe/MgB₂ tapes with various MgB₂ particle sizes," *Physica C* **401** (2004) 305-309
- 12) W. Goldacker and S. I. Schlachter: "Influence of mechanical reinforcement of MgB₂ wires on the superconducting properties," *Physica C* **378-381** (2002) 889-893
K. Yamamoto, K. Osamura, S. Balamurugan, T. Nakamura, T. Hoshino and I. Muta: "Mechanical and superconducting properties of PIT-processed MgB₂ wire after heat treatment," *Supercond. Sci. Technol.* **16** (2003) 1052-1058
W. Goldacker, S. I. Schlachter, B. Obst and M. Eisterer: "In situ MgB₂ round wires with improved properties," *Supercond. Sci. Technol.* **17** (2004) S490-S495
- 13) K. Katagiri, A. Iwamoto, Y. Shoji, K. Tachikawa, Y. Yamada, K. Watanabe and T. Mito: "Stress/strain characteristics of PIT MgB₂ tapes with nickel sheath—effect of indium addition to the core," *Physica C* **397** (2003) 95-98
- 14) K. Tanaka, M. Okada, H. Kumakura, H. Kitaguchi and K. Togano: "Fabrication and transport properties of MgB₂ wire and coil," *Physica C* **382** (2002) 203-206
M. Fu, J. Chen, Z. Jiao, H. Kumakura, K. Togano, L. Ding, Y. Zhang, Z. Chen, H. Han and J. Chen: "Mechanical properties and bending strain effect on Cu-Ni sheathed MgB₂ superconducting tape," *Physica C* **406** (2004) 53-57
W. Goldacker, S. I. Schlachter, B. Obst, B. Liu, J. Reiner and S. Zimmer: "Development and performance of thin steel reinforced MgB₂ wires and low-temperature in situ processing for further improvements," *Supercond. Sci. Technol.* **17** (2004) S363-S368
- 15) B. ten Haken, A. Godeke, and H. H. J. ten Kate: "The influence of compressive and tensile axial strain on the critical properties of Nb₃Sn conductors," *J. IEEE Trans. Appl. Supercond.* **5** (1995) 1909-1912
N. Cheggour and D. P. Hampshire: "Unifying the strain and temperature scaling laws for the pinning force density in superconducting niobium-tin multifilamentary wires," *J. Appl. Phys.* **86** (1999) 552-555
- 16) B. ten Haken, A. Godeke, and H. H. J. ten Kate: "The strain dependence of the critical properties of Nb₃Sn conductors," *J. Appl. Phys.* **85** (1999) 3247-3253
D. Uglietti, B. Seeber, V. Abacherli, A. Pollini, D. Eckert, and R. Flükiger: "A device for critical current versus strain measurements up to 1000 A and 17 T on 80 cm long HTS and LTS technical superconductors," *Supercond. Sci. Technol.* **16** (2003) 1000-1004
- 17) M. Dhalle, H. van Weeren, S. Wessel, A. den Ouden, H. H. J. ten Kate, I. Husek, P. Kovac, S. Schlachter, and W. Goldacker: "Scaling the reversible strain response of MgB₂ conductors," *Supercond. Sci. Technol.* **18** (2005) S253-S260