

平成 2 3 年度戦略的基盤技術高度化支援事業

「ユビキタス超電導磁石の開発に資する  
鉄系形状記憶合金の締付技術の高度化」

研究開発成果等報告書

平成 2 5 年 1 月

委託者 関東経済産業局

委託先 淡路マテリア株式会社

## 目 次

第1章 研究開発の概要	3
1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標	3
1-2 研究体制 (研究組織・管理体制、研究者氏名、協力者)	7
1-3 成果概要	9
1-4 当該研究開発の連絡窓口	11
第2章 本論	12
①鉄系形状記憶合金の極低温での物性評価	12
②超電導バルク材料への鉄系形状記憶合金の最適活用法の検討	14
③川下製造業者の要求する超電導バルク材料の作製	16
④鉄系形状記憶合金による補強技術の開発	17
⑤川下製造業者での製品化検討のための試供品の提供と評価の推進	20
最終章 全体総括	22

## 第1章 研究開発の概要

### 1-1 研究開発の背景・研究目的及び目標

2011年3月に生じた原発事故以降、太陽光発電や風力発電の導入が積極的に進められているが、これらの自然エネルギーを利用する発電方式は発電量の変動が大きいので、エネルギー貯蔵装置との併用が必要である。その装置の一つとして期待されているのが超電導バルク体の磁気浮上特性で損失を抑えた超電導フライホイールである。また、超電導バルク体は永久磁石よりもはるかに強力な磁場源になるため、それを利用した再生医療や水質浄化システムなど医療や環境などの様々な分野での応用も進められている。

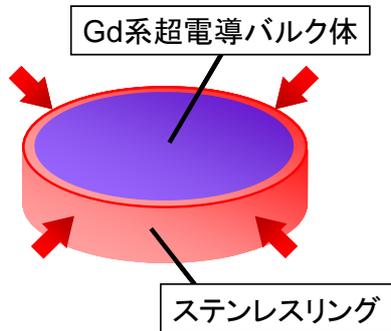
しかし、超電導バルク体は脆いセラミックスのため、磁化する際に発生する応力や、磁石として使用する際の負荷によって破壊することがあり、高機能磁石としての優れた性能を安定して発揮させることが難しいという問題があった。

この対策としては、円盤状の超電導バルク体をステンレス鋼やアルミニウム等の金属リングを用い、両者の熱膨張係数の差を利用して締付ける「冷やしばめ」が行われている。これにより、セラミックスの機械特性の大きな弱点である引張応力に対する強度が改善される。しかし冷やしばめで利用できるひずみは1%以下と小さいため、部材に対して事前に寸法精度の高い精密機械加工が求められる。超電導バルク材は脆い難加工性材であるため、加工時に欠陥が発生しやすいうえ加工にも長時間を要する。予備機械加工の精度が悪ければ「冷やしばめ」の効果が得られないことから、精密機械加工を必要とする冷やしばめは製品の価格を押し上げる原因ともなっている。

ところで当社は過去19年間に渡り、鉄系形状記憶合金を鋼管や構造部材の締結に応用する技術開発を継続的に行って、世界で初めての鉄系形状記憶合金製品を世の中に提供している。この鉄系形状記憶合金の形状回復ひずみは3%以上にも達するから、一般の金属の冷やしばめで利用できる熱膨張差に比べて著しく大きい(図1-1)。鉄系形状記憶合金の大きな形状回復ひずみを利用すれば、超電導バルク体にさほど高精度の加工を要求せずに金属リングを締結できる可能性がある。機械加工時間も短くてすみ、低価格で壊れにくい超電導バルク体を得られるものと思われる。さらに鉄系形状記憶合金は形状回復時に200MPa程度の応力が発生することも知られている。すなわち超電導バルク体を形状記憶合金製リングで補強すれば、超電導バルク体をかなり強い応力で締め付けることもできるので、この応力が超電導バルク体の特性に対してどのような影響を与えるかも注目される場所である。

また、日本で製造販売されているバルク体の価格はφ40のもので25~35万円程度と非常に高価であることも、これを用いた製品の実用化が進まない大きな原因である。そこで本提案では、レアアースの中でも安価なイットリウム系の原材料を用いた新しい超電導バルク体を実現する技術開発を行うことにした(図1-2)。

### 従来技術



ステンレスリングによる補強

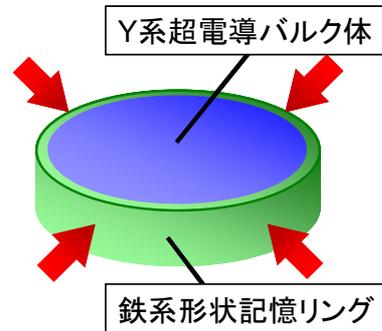
収縮率: 1%程度(熱膨張)

(ステンレスの線膨張率 $17.3 \times 10^{-6}/K$ ,  
600 K加熱)

- 精密な寸法精度が必要
- 加工に時間がかかる
- Gd、Ptでバルク体作製

高価

### 新技術



形状記憶合金リングによる補強

収縮率: 3.5~5%程度

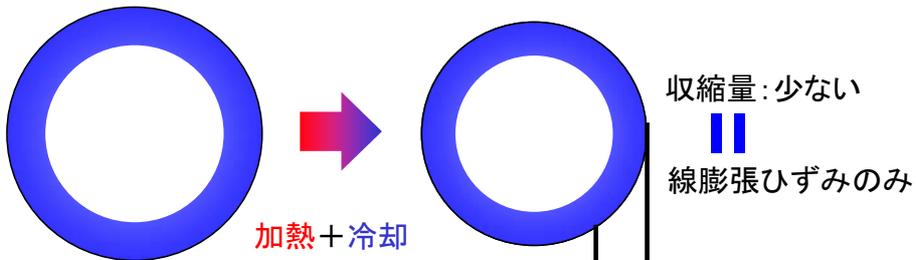
(形状回復ひずみ+熱膨張)

- 精密な寸法精度を必要としない
- 短時間で加工が終了する
- Y、Ceでバルク体作製

安価

図 1-1 ステンレスリングと形状記憶合金のリングの寸法変化

#### ◆ステンレスリングの場合



#### ◆形状記憶合金のリングの場合

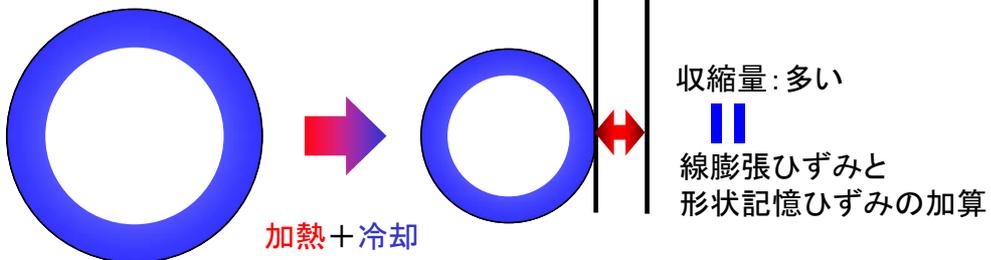


図 1-2 従来技術と新技術との効果の比較

本研究開発では、以上のように安価で特性の安定した超電導バルク体の製造を可能にするとともに、これを鉄系形状記憶合金リングで補強して、安くて壊れにくい実用的な超電導バルク体を川下産業に提供を行えるようにし、それによって超電導産業全体の活性化に貢献することを目的として、下記の5つのサブテーマを設定した。

#### ①鉄系形状記憶合金の極低温での物性評価

鉄系形状記憶合金の締結技術の対象となる超電導バルク磁石は、液体窒素温度付近の極低温領域で使用される。一方従来の鉄系形状記憶合金の応用は主として室温近傍に限定されていた。したがって、極低温環境における鉄系形状記憶合金の物性はこれまでほとんど調べられていなかった。このため、室温から極低温までの広い温度範囲で、鉄系形状記憶合金の内部で相変態や磁気的な特性変化がどのように起こり、その結果として形状回復応力がどう変化するか、さらに室温と $-180^{\circ}\text{C}$ との間で繰り返し温度変化を与えた時にその特性が安定して維持されるかどうかを調べる必要がある。

組成の異なる3鋼種の試料を丸棒試験片に機械加工し、室温から極低温( $-180^{\circ}\text{C}$ )までの温度範囲で機械的特性評価試験および形状回復特性試験に供した。加えてこの鉄系形状記憶合金は、加工と加熱の繰り返しで形状回復ひずみ量が増加するという「トレーニング効果」があることが知られている。本開発ではこのトレーニング効果の活用についても検討した。

#### ②超電導バルク材料への鉄系形状記憶合金の最適活用法の検討

全鋼種についてリング状試験片を準備し、拡張治具を挿入して拡張処理を行ない、リング状試験片における拡張ひずみと形状回復ひずみの関係を調べた。より効果的な締付け条件を得るため、リング形状でのトレーニング効果についても調べた。超電導バルク体は高温で加熱すると捕捉磁場特性が低下するので、最適な形状回復温度についても調べた。さらに、形状記憶合金リングの厚さを含む形状サイズの影響についても検討した。

#### ③川下製造業者の要求する超電導バルク材料の作製

市販されている高価なガドリニウム系超電導バルク体の代わりに、安価なレアアースであるイットリウム(Y)を主としたY-Ba-Cu-O系でバルク体を製作し、通常添加物として使われているPtの代わりにCeを用いて低コスト化を目指した。この他、原料粉末の予備処理、仮焼、結晶成長処理などの工程の最適条件を検討し、これらの総合的な評価を元に製作条件の検討を行い、77Kで0.7T以上の捕捉磁場を有する超電導バルク体の開発、超電導バルク体の大型化、大量生産法の開発を目標とした。

#### ④鉄系形状記憶合金による補強技術の開発

超電導バルク体の破壊防止効果を得るため、鉄系形状記憶合金のリングの中に超電導バルク体をはめ込んだ状態で形状記憶効果を発現させ、リングの収縮による超電導バル

ク体締付けの効果を定量的に検討した。

また、用途によっては磁場指向性の優れたユビキタス型超電導バルク体を求められる応用分野があるので、複数のバルク体を重ね合わせて1個の鉄系形状記憶合金リングで一体化した場合の特性も調べた。

さらに、本研究開発で得られる製品の外周部は鉄系形状記憶合金リングで囲われているため、通常の旋盤で自由に加工でき、バルク体の高さよりも鉄系形状記憶合金リングの高さを厚くすることで、樹脂コーティングを効果的に行なうことができる。

#### ⑤川下製造業者での製品化検討のための試供品の提供と評価の推進

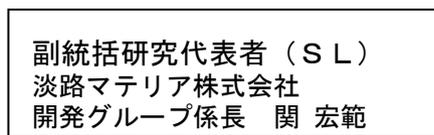
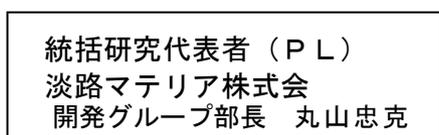
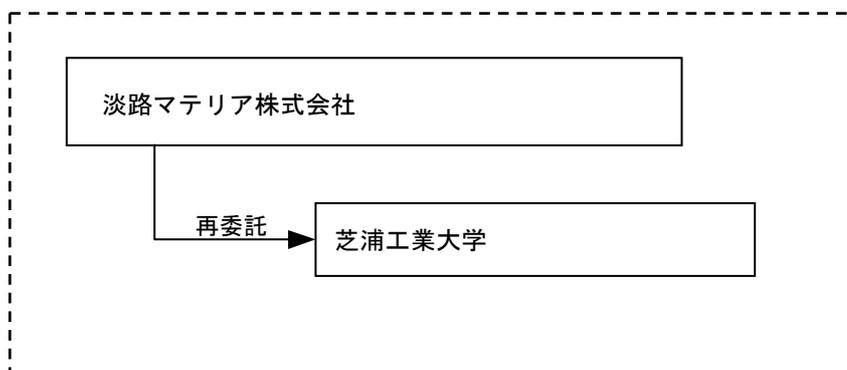
この他、ユビキタス超電導マグネットシステムの川下産業での利用を促すためには、川下産業の意見を直接取り入れながら、実機に近い形での性能を評価することも必要である。このため、川下企業や大学などの教育機関、研究所などにサンプルを無償提供し、使用者側の感触を把握し研究開発に活用した。

加えて、超電導フライホイール装置（回転エネルギーの形で電力エネルギーを貯蔵・供給する装置）は負荷平準化に貢献することができることから、本事業で得られた鉄系形状記憶合金リングで補強された超電導バルク体が超電導フライホイール装置の浮上磁石として十分な特性を示すかどうかを調べた。また本研究開発の過程で得られた新しい知見は即特許化することを目指した。

## 1-2 研究体制

### (1) 研究組織及び管理体制

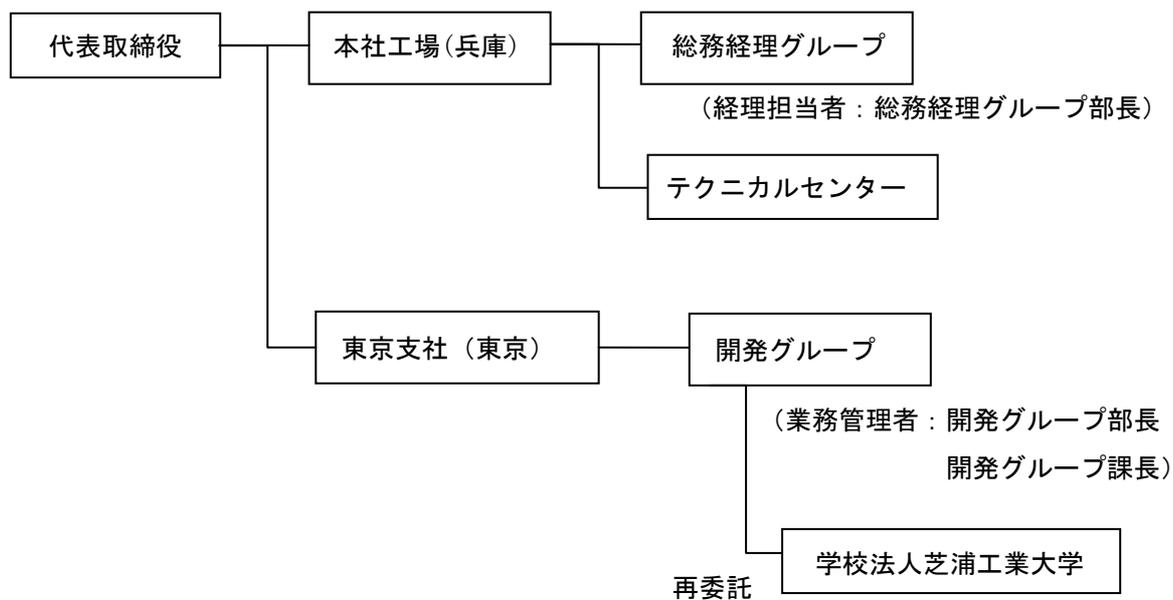
研究組織（全体図）



### 管理体制

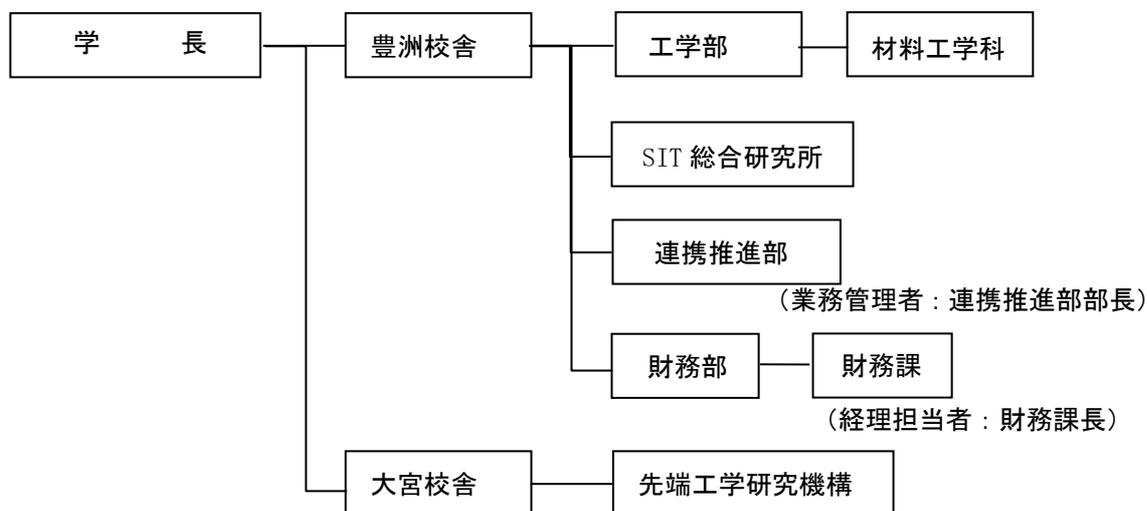
#### ①事業管理機関

[淡路マテリア株式会社]



② 再委託先

[学校法人芝浦工業大学]



(2) 研究者氏名

【事業管理機関】 淡路マテリア株式会社

氏名	所属・役職
丸山 忠克	開発グループ 部長
関 宏範	開発グループ 係長
皆川 俊一	開発グループ
野村 美樹	テクニカルセンター センター長
豊田 豪紀	テクニカルセンター
河崎 慎司	テクニカルセンター

【再委託先】

学校法人芝浦工業大学

氏名	所属・役職
村上 雅人	材料工学科 教授
腰塚 直己	材料工学科 教授
中山 千秋	SIT 総合研究所 教授

協力者

氏名	所属・役職
佐保 典英	株式会社日立製作所 機械研究所 主管研究員
澤口 孝宏	独立行政法人 物質・材料研究機構 主幹研究員

### 1-3 成果概要

#### サブテーマ①鉄系形状記憶合金の極低温での物性評価

添加元素種類の少なくリサイクル性に優れる Fe- 28wt%Mn- 6wt%Si- 5wt%Cr 鉄系形状記憶合金の他、3wt%Ni を添加した低温における形状回復特性に優れる Fe- 28wt%Mn- 6wt%Si- 5wt%Cr- 3wt%Ni 鉄系形状記憶合金、Mn 添加量を 16wt% に抑え大量生産性に優れる Fe- 16wt%Mn- 5wt%Si- 12wt%Cr- 5wt%Ni 鉄系形状記憶合金の 3 鋼種を試作し、室温と -180°C との間で機械的特性および形状回復特性を調べた。

加えて、ニッケル添加鋼は、マルテンサイト変態開始温度が -50°C 付近にあることが予想されるため、通常は室温で行う予ひずみ付与を -50°C の低温で行う試験も実施した。全ての鋼種でネール点を測定し、形状記憶特性を示すことを確かめた。

この結果、全ての鋼種で -180°C もの低温環境下において 20% を超える伸びを示し、また、それぞれの鋼種で最適な予ひずみ量および形状回復率を調べた。また、全ての鋼種でトレーニング効果およびその処理方法を明らかにした。

#### サブテーマ②超電導バルク材料への鉄系形状記憶合金の最適活用法の検討

鉄系形状記憶合金のリングを作製し、このリングに対して拡径処理を行い、基本的特性の評価を行った。また、事前に付与する変形と加熱処理を繰り返すトレーニング効果について調べ、形状回復ひずみと形状回復応力を最適化する条件を確立した。また、肉厚が形状回復ひずみ量に及ぼす影響について明らかにした。また、肉厚の効果を調べる過程において、薄肉リングの拡径方法を見出した。

3 鋼種のうち、超電導バルク体の締め付け効果に最適な鋼種として、添加元素種類の少なくリサイクル性に優れる Fe- 28wt%Mn- 6wt%Si- 5wt%Cr 鉄系形状記憶合金が最も超電導バルク体の締め付け材料として優れていることを判断した。

#### サブテーマ③川下製造業者の要求する超電導バルク材料の作製

安価な Y-Ba-Cu-O 系でバルク体を製作し、この過程において、原料粉末の予備処理、仮焼、結晶成長処理、成形バインダーの調整などの様々な工程の最適条件を精査検討した。この結果、当初 77K で 0.7T 以上の捕捉磁場を有する超電導バルク体の開発を目標としていたが、最終的に 40mm の円盤形状の単結晶超電導バルク体の最大捕捉磁場は 9,850G を達成した。また、φ60 を有する超電導バルク体の作製に成功した他、大量生産法についての知見を得た。

#### サブテーマ④鉄系形状記憶合金による補強技術の開発

作製した超電導バルク体に対して、鉄系形状記憶リングで締結試験を行った。リング内径収縮ひずみ 2.8% を利用して補強した超電導バルク体は 850°C に加熱後、液体窒素 (-196°C) で急冷しても熱衝撃で破壊することはなかった。一方、リング補強していないバルク体は

200℃に加熱後に液体窒素に投入しただけで割れが発生した。この鉄系形状記憶合金リングの高い収縮性を利用することで、円盤状の4個の超電導バルク体を一体化することにも成功した。この重ねたバルク体の捕捉磁場は、バルク単体の場合に比べて1.36倍の高い値を示した。

この鉄系形状記憶合金リングで締結補強された超電導バルク体は、42Kという低温環境下において、約46,000Gもの磁場を捕捉することを確認しており、ドラッグデリバリーシステムや水質浄化システムなど、超電導バルク体の高磁場を利用したシステムにて十分な特性を有することを示した。

また樹脂含浸においては、従来採用されていた高価なCFRPに比べて安く、かつ極低温環境下において弾性性能を有するシリコン樹脂を用いたコーティング技術を確立した。

#### サブテーマ⑤川下製造業者での製品化検討のための試供品の提供と評価の推進

本サポイン研究で作製したサンプルを外部評価に供するため、計6機関（香川高等専門学校、株式会社 中信理化製作所、有限会社マグネオ技研、セイコー化工機株式会社、日本科学未来館、芝浦工業大学）に試料提供を行った。この結果、全ての機関において、浮上高さ（12mm以上）や安定回転特性（3,000rpm以上）など、それぞれの要求を満足する評価を頂いた。これにより、教材としての販売や、超電導回転機器、超電導フライホイール用浮上磁石など市場販売が行えることが示された。

以上のことからすべてのサブテーマにおいて目標を達成することができた。

以上の成果報告により、部材の結合技術の高度化により得られた鉄系形状記憶合金リングで補強された超電導バルク体は安価な原料を用いたにもかかわらず従来の製品に比べて非常に壊れにくく、特性についても川下企業の要求を満足するものとなっている。また、安価に製造・販売できる技術を確立することができた。この鉄系形状記憶合金で補強されたバルク体は他社には無い独自の製品と成り得ており、超電導バルク体を用いる川下産業の動きと連動しながら当社として事業化を進めていく予定である。

#### 1-4 該当研究開発の連絡窓口

氏名：丸山忠克

所属・役職：開発グループ部長

Tel: 03-6421-2031 Fax: 03-3295-1673

E-mail: t.maruyama@awaji-materia.co.jp

氏名：坂井裕美

所属・役職：開発グループ課長

Tel: 03-6421-2031 Fax: 03-3295-1673

E-mail: h.sakai@awaji-materia.co.jp

## 第2章 本論

### サブテーマ① 鉄系形状記憶合金の極低温での物性評価

それぞれ異なる特徴を有する Fe- 28wt%Mn- 6wt%Si- 5wt%Cr 合金（以下、SMC 材と示す。）および、Fe- 28wt%Mn- 6wt%Si- 5wt%Cr- 3wt%Ni 合金（以下、SMCN 材と示す。）、Fe- 16wt%Mn- 5wt%Si- 12wt%Cr- 5wt%Ni（以下、16Mn-12Cr 材と示す。）鉄系形状記憶合金を準備し、低温環境下における機械的特性の評価を行い、伸びや引張強さ、0.2%耐力を評価した。加えて、低温環境下における形状回復試験を行い、形状回復ひずみ量を測定した。また、この鉄系形状記憶合金は、形状回復と加熱を繰り返すことで形状回復量が増加することが知られているため（トレーニング処理）、このトレーニング処理についても評価した。また、変態点を測定することで、定量的な処理温度を把握できるようになるため、変態点測定を実施した。

図 2-1-1 に SMCN に対する引張試験の結果を示す。ここで、横軸は温度、左の縦軸は 0.2%耐力および引張強さを示す。右の縦軸は伸び(%)である。

引張強さおよび 0.2%耐力は温度の低下に伴い、線形的に増加する。伸びについて、低温環境下にも関わらず、全ての鋼種で 20%以上もの値を示した。これによりこの試料をリング状に加工し、その後拡径するとき破壊しないことを示している。

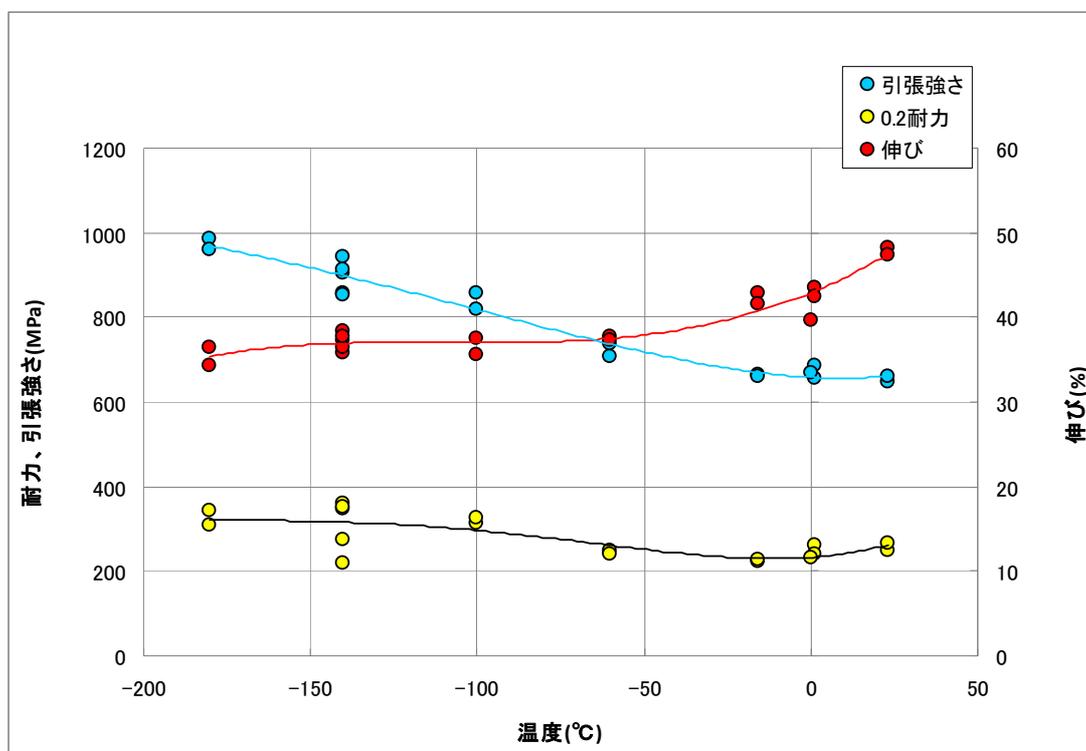


図 2-1-1 SMCN 材の引張試験結果

図 2-1-2 に、SMCN 材の第 1 変形予ひずみ処理後と第 2 変形予ひずみ処理後の形状回復ひずみ量と予ひずみ率の関係を示す。第 1 変形予ひずみ処理後では形状回復ひずみ率は予ひずみ率 6.0~8.0%のものが最も高く、第 2 変形予ひずみ処理後では予ひずみ率 6%が最も高い。この他、それぞれの鋼種によって形状回復ひずみ量に差が生じた。これは、前項に示したとおり、組成の違いによって変態開始温度や応力誘起変態によって発現する相が異なるためである。第 1 変形予ひずみ処理を行わない試料の形状回復ひずみ量より、第 2 変形予ひずみ処理を施した試料の形状回復ひずみ量は増加している。このことから、本試験材においてもトレーニング効果を確認することができる。

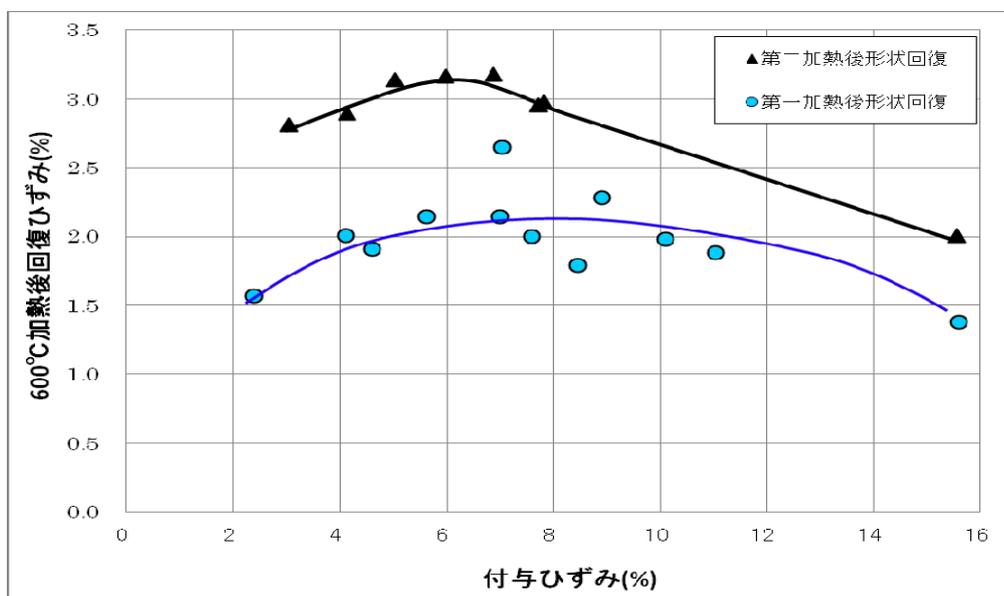


図 2-1-2 丸棒試験における、形状回復ひずみ量と予ひずみ率の関係

## サブテーマ②超電導バルク材料への鉄系形状記憶合金の最適活用法の検討

前項では鉄系形状記憶合金の基本的な特性を丸棒形状の試験片によって調べてきたが、これを超電導バルク体に活用するためには、リング形状とすることが必要である。そこで次にリング形状の鉄系形状記憶合金を使って、丸棒試験片の結果を参照しながら、超電導バルク体に活用するためのより具体的な予ひずみの検討を行った。

試験により超電導バルク体のリング締結に最も適した鋼種を選定し、この鋼種において最も形状回復率の良い拡張率について検討を行った。試験片サイズは高さ 15mm、肉厚 3.0mm であり、内径を 35.3~32.4mm と試験片によって変えることにより、同一拡張治具を用いた場合であっても、リングに与えることのできる内径予ひずみ率を変えた。また、肉厚の影響を調べるための試験片については、肉厚を 1.5mm、3.0mm、6.0mm と異なる試験片を準備することによって、肉厚が形状回復ひずみに及ぼす影響を調べた。

リングに、プレス機を用いてテーパのついた棒状の拡張治具を押しこみ、リングを内側から広げることによって拡張を行った。鉄系形状記憶合金は、加工と形状回復用の加熱を施す回数によって形状回復率が改善するため、2回拡張処理を行った。なお、最初に行う拡張処理を第1拡張処理、2回目に行う拡張処理を第2拡張処理とした。

図 2-2-2 に SMCN リング部材の第1拡張処理時の拡張ひずみと加熱温度の関係を示す。ここで、図のプロットの色の違いは拡張予ひずみの違いを示す。内径回復ひずみは加熱温度の増加に伴い増加する。しかし、300℃以上の加熱を行なっても、そのひずみは変化しないことから、内径回復ひずみは飽和してしていることがわかる。

飽和時の内径回復ひずみ量は、予ひずみ量 6~8% 時のものが最も高い。これは、丸棒試験片の時と同様、リング試験片の場合においても形状回復率に適した予ひずみ量が存在することを示している。

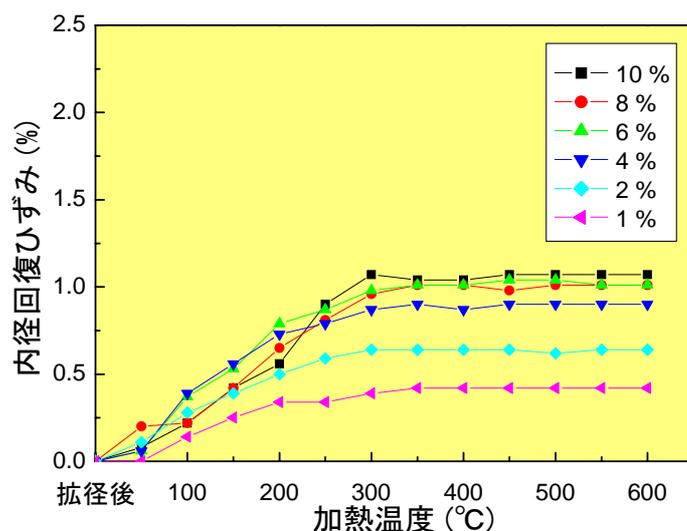


図 2-2-1 SMCN リング部材の第1拡張処理時の拡張ひずみと加熱温度の関係

図 2-2-2 に、SMCN 合金リング部材の第 2 拡張処理時の拡張ひずみと加熱温度の関係を示す。ここで、プロットの色の違いは第 1 拡張ひずみ量の違いを表し、第 2 拡張ひずみ量は全て 6.5%である。結果として、第 2 拡張処理時の内径回復ひずみ量は、第 1 拡張処理時の内径回復ひずみ量より増加する。これによりリング試験片でもトレーニング効果を示すことが確認できた。

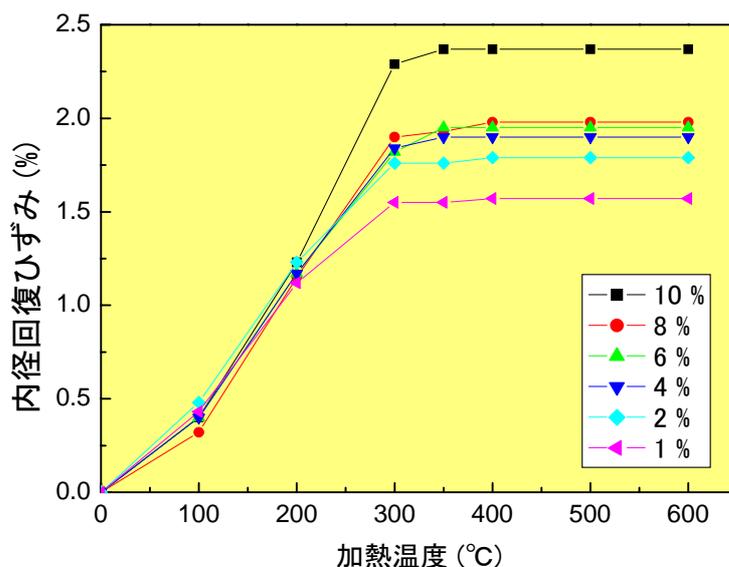


図 2-2-2 SMCN リング部材の第 2 拡張処理時の拡張ひずみと加熱温度の関係

全ての鋼種において、加熱温度、拡張ひずみ、トレーニング効果、肉厚の影響などを調べた結果、超電導バルク体の締付けに SMC 材 (Fe- 28wt%Mn- 6wt%Si-5wt%Cr) が最も有効であることを明らかにした。またこの研究過程において、最も形状回復率の優れる拡張条件を得ることに成功した。

### ③川下製造業者の要求する超電導バルク材料の作製

図 2-3-1 に、本サポイン事業で作製した超電導バルク体の作製時期と最大捕捉磁場の関係を示す。初期の頃のバルク体の特性は平均で 1,000G 程度であったが、後期には平均 5,700G 程度になり、また、5,000G を超える平均歩留まりは 80%以上を達成した。また最大捕捉磁場 7,000G を超えるバルク体の作製も完了しており、目標値を無事達成した。それぞれの製造時期において、原料粉末の粒径やバインダーの添加量など様々な工夫を行った結果、時期により捕捉磁場性能にバラつきが存在する結果となった。これらの経験により安価に超電導バルク体の作製が安定して行えるようになった。

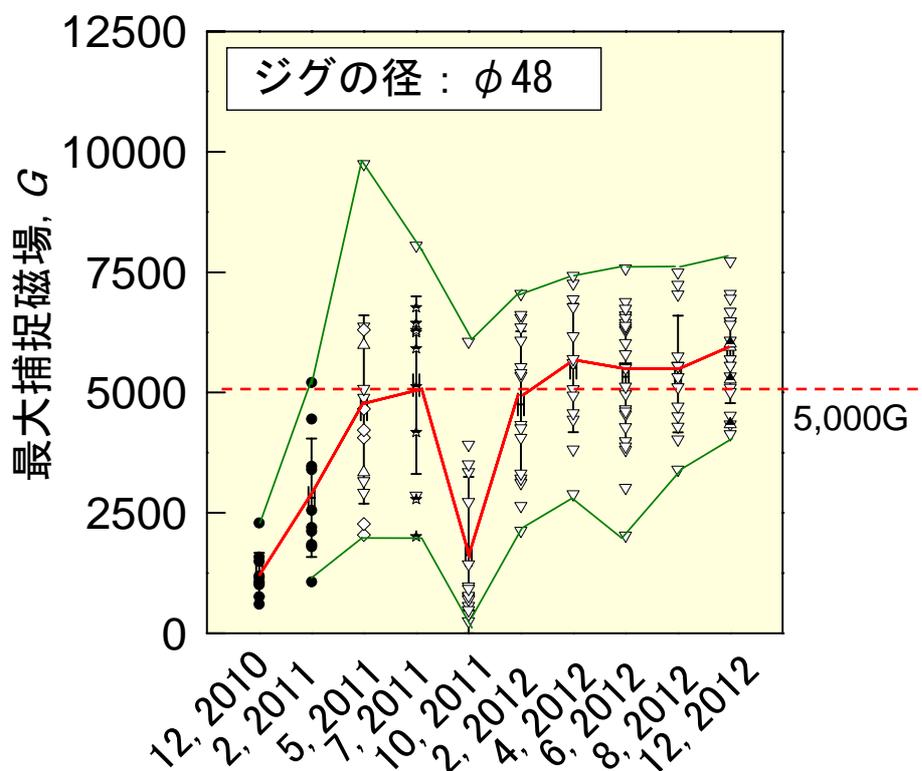


図 2-3-1 本サポイン事業で作製した超電導バルク体の作製時期と最大捕捉磁場の関係

#### サブテーマ④鉄系形状記憶合金による補強技術の開発

サブテーマ③で作製した超電導バルク体に対して、サブテーマ①および②で鋼種および拡径条件の確立した鉄系形状記憶合金リングを用いて締結試験を行った。

リング締結した試料とリング締結していない試料に対して加熱と液体窒素による急冷試験を繰り返し、超電導バルク体に発生する割れを観察することにより鉄系形状記憶合金の破壊防止効果を確認した。試験方法として、200℃で30分間電気炉で加熱後、すぐに炉から取り出し、液体窒素の中に入れる。バルク体の割れをデジタルカメラで確認後、+50℃温度を上昇させた250℃の電気炉の中に試料を入れ30分間加熱を行なう。この加熱と冷却を電気炉の温度が850℃になるまで繰り返した。

図2-4-1に、鉄系形状記憶合金で締結補強された超電導バルク体の割れ防止試験の試験結果を示す。鉄系形状記憶合金リングで補強された超電導バルク体は、補強されていない超電導バルク体と違い、200℃加熱後に液体窒素に入れても割れが発生することはなかった。その後、+50℃ずつ加熱温度を上昇させるごとに液体窒素に投下する試験を繰り返したが、850℃加熱後液体窒素に投下した場合であっても超電導バルク体は破壊しなかった。実際には、超電導バルク体を200℃を超える加熱を行なうことはないが、以上の結果から鉄系形状記憶合金リングには超電導バルク体の補強に対して非常に優れた補強効果があることが示された。

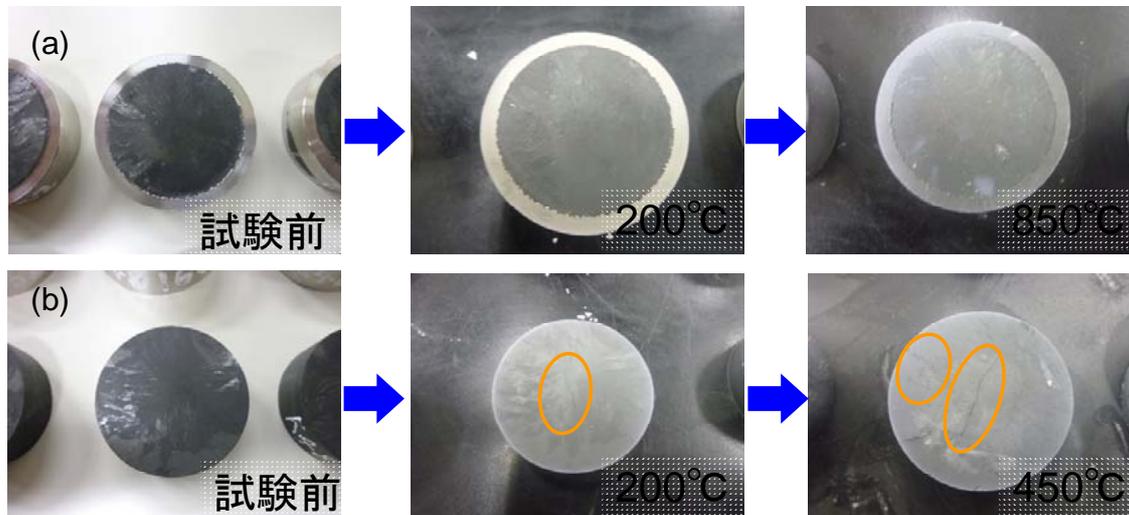


図2-4-1 超電導バルク体に対して鉄系形状記憶合金リングで締結補強(a)した試料、および(b)していない試料の破壊防止確認試験結果

超電導バルク体の破壊の原因の一つに、極低温環境下において超電導バルク体が高磁場を捕捉した時にローレンツ力によって破壊するということが挙げられる。このため、鉄系形状記憶合金リングによって締結補強された超電導バルク体を冷凍機によって45Kという極低温に冷やし、50,000G (5T) という高磁場を補足させることによってバルク体に割れが発生するかどうかを調べた。図2-4-3に試験に用いたユビキタス超電導マグネット用冷却システムを示す。装置の先端にバルク体を装着し、冷凍機と純銅の熱伝導冷却によって冷却される。高磁場源として、5Tもの高磁場を発生させることのできる超電導マグネットを用いた。

図2-4-4 (左図) に、鉄系形状記憶合金リングで補強された超電導バルク体の捕捉磁場分布図を示す。超電導バルク体は42Kに冷却され、印加磁場印は50,000G、バルク体表面からの測定距離は6.3mmである。中央の捕捉磁場が最も高く、一つのピークを有する等高線で結果が表されているため、この試料に割れが発生していないことを示している。この試験の結果、鉄系形状記憶合金により補強された超電導バルク体は強度が高く、高地場を捕捉する場合に発生する力に耐えられることが明らかになった。図2-4-4 (右図) に、この実験における捕捉磁場と距離の関係を示す。捕捉磁場と距離の関係は経験的に明らかにされており、経験則を用いて最大捕捉磁場を計算した結果、46,000Gもの磁場を捕捉していることが分かった。



図2-4-3 試験に用いたユビキタス超電導マグネット用冷却システム

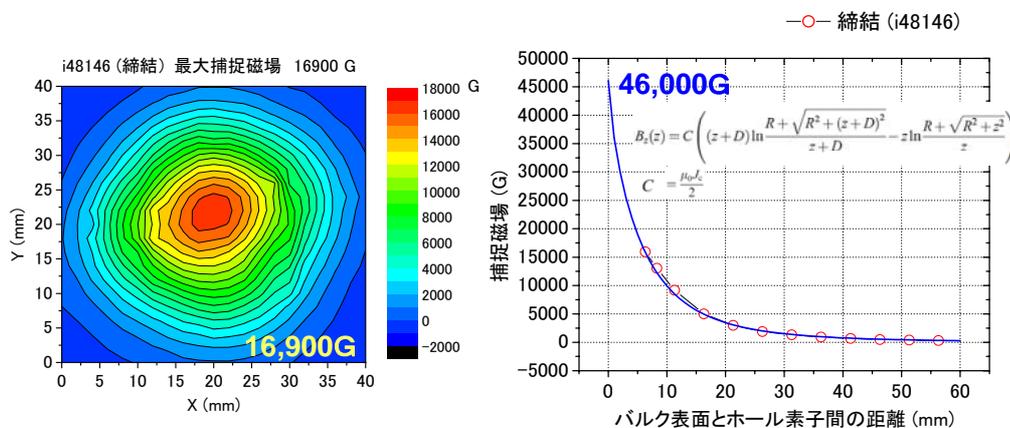


図2-4-4 (左図) 鉄系形状記憶合金リングで補強された超電導バルク体の捕捉磁場分布図。(右図) バルク体表面からの距離と捕捉磁場の関係。

超電導バルク体を再生医療や DDS システムに利用するためには、遠くの患部に磁場を作用させる必要がある。ここで肉厚のある超電導バルク体は、磁場を平行に捕捉するために磁場が遠くに飛びやすいという特徴を有する。このため肉厚のあるバルク体は、再生医療や DDS システムに有利である。しかしながら、超電導バルク体はセラミックスの結晶成長を利用して作製される単結晶体であるため、肉厚のある超電導バルク体の作製が得にくいという問題がある。

本研究開発で得られた鉄系形状記憶合金リングの収縮率は 2.8% と非常に高いため、円盤状の超電導バルク体を何層か重ねて締結することが可能であると考えられた。そこで、第 2 拡径処理後に寸法内径 37.2mm×外径 44.2mm×肉厚 3.5mm×高さ 45mm となった長尺の鉄系形状記憶合金リング 1 個と、直径 37.0mm×高さ 10.5mm の超電導バルク体 4 個を準備し、バルク体を 4 つ縦に並べこの長尺リングで締結試験を行った。締結後、旋盤加工により切削加工を行い外径 43.0×高さ 43mm (×リング肉厚 3mm) の試料を作製した。図 2-4-7 に、(a) その試料の外観、(b) 捕捉磁場分布図、(c) バルクを重ねない場合のとの捕捉磁場の比較を示す。締結は非常に簡単に行うことができた。複数個のバルク体を重ねて締結した場合でもバルク体を重ねない場合と同様、最大磁場の位置はバルク体中央であり、そのピークは一つであることから、バルクを重ねた場合であっても割れなどは発生していないことがわかる。また、超電導バルク体を 4 個重ねた試料の捕捉磁場は、単一バルク体の捕捉磁場に比べて 1.36 倍捕捉磁場が向上した。これは、バルク体が重ねられているため、磁場が遠くに飛んでいるためといえる。このことから、再生医療や DDS システムに最適な厚肉の超電導バルク体を鉄系形状記憶合金リングを用いた複数個の薄肉のバルク体の締結によって達成できることを確認した。

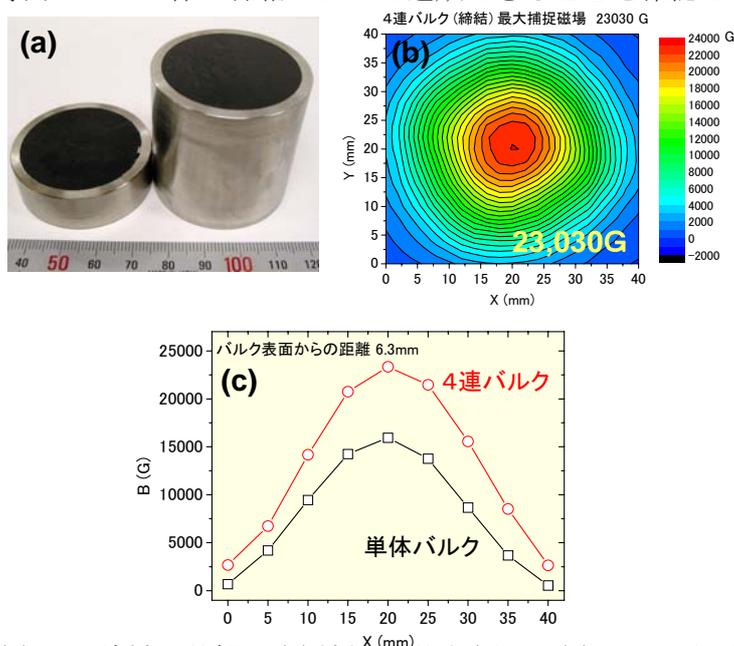


図 2-4-7 に、(a) その試料の外観、(b) 捕捉磁場分布図、(c) バルクを重ねない場合のとの捕捉磁場の比較

## ⑤川下製造業者での製品化検討のための試供品の提供と評価の推進

本サポイン計画で作製した鉄系形状記憶合金リングで補強された超電導バルク体が川下企業の要求に満足できるかどうか、また、問題があればその結果を研究開発に活かすため本サポイン研究で作製したサンプルを外部評価に供した。

2012年11月3、4日香川高等専門学校の高松キャンパスで行われたオープンキャンパスにて使用された。浮上力・浮上高さも十分であり、学生らに好評を得た。また、2011年8月1日株式会社中信理化製作所の浮上用デモ教材用のバルク材としても十分な浮上特性を示し高い評価を得た。完全反磁性を示す本材料は視覚的・体感的興味をそそるものであり学生の教材として十分魅力であるとの評価を得た。

2012年9月6日に有限会社マグネオ技研およびセイコー化工機株式会社らが開発を進めている超電導回転機器に対して本サンプル品を提供した。マグネオ技研からは浮上高さ12mm以上、セイコー化工機からは回転速度3,000rpm以上というバルク体性能要求があった(図2-5-1)。これに対して、試作機に本サンプルを組み込んで評価した結果、十分な浮上高さ(12mm以上達成)、安定した回転性能(3,000rpm達成)を備えていることが分かった。また、鉄系形状記憶合金リングをバルク体周辺部に配置してあることで、段差付き加工が容易になり、装置への固定が用意になるとの評価を受けた。

2011年6月21日、日本科学未来館の超電導バグレブを使用した未来の都市モデル「2050年くらしのかたち」モニュメントに組み込まれたリニア高速鉄道模型用浮上磁石としてサンプル提供を行った(図2-5-2)。磁気レールの上を鉄道模型に組み込まれたサンプルが位置エネルギーを利用して移動するものであるが、これについても十分な浮上性能があることが分かった。

2012年12月10日、芝浦工業大学村上雅人先生が推進するアキシアル型超電導フライホイールシステムの浮上用磁石としてサンプル提供を行った。台座に鉄系形状記憶合金で補強された超電導バルク体150個並べ、液体窒素を注ぎ超電導状態とした。その後、超電導フライホイールを想定した小型磁石を多数並べた超電導フライホイール用円盤を乗せた。その結果、150kg(磁石重さを含む)もの物体を高さ20mm以上持ち上げることが可能であることが示された(図2-5-3)。また、回転エネルギーの損失を調べた結果、時間の経過に伴い空気抵抗により回転速度の低下が見られた。しかしその損失分は非常に僅かなものであることから、鉄系形状記憶合金リングで補強された超電導バルク体は十分に超電導フライホイール用浮上磁石として使用可能であることを確認した。これらのことにより、本サブテーマについても十分に目標を達成できたといえる。

以上の成果報告により、部材の結合技術の高度化により得られた鉄系形状記憶合金リングで補強された超電導バルク体は従来の製品に比べて非常に強度が高く、特性についても川下企業の要求を満足している。また、安価に製造・販売できる技術を確認することができた。この鉄系形状記憶合金で補強されたバルク体は他社には無いメリットを有しており、これを製品の付加価値として、市場に参入する予定である。



図 2-5-1 ポンプ用回転機器にて高速回転するバルク体



図 2-5-2 日本科学未来館にて磁気浮上列車用の浮上磁石として使用

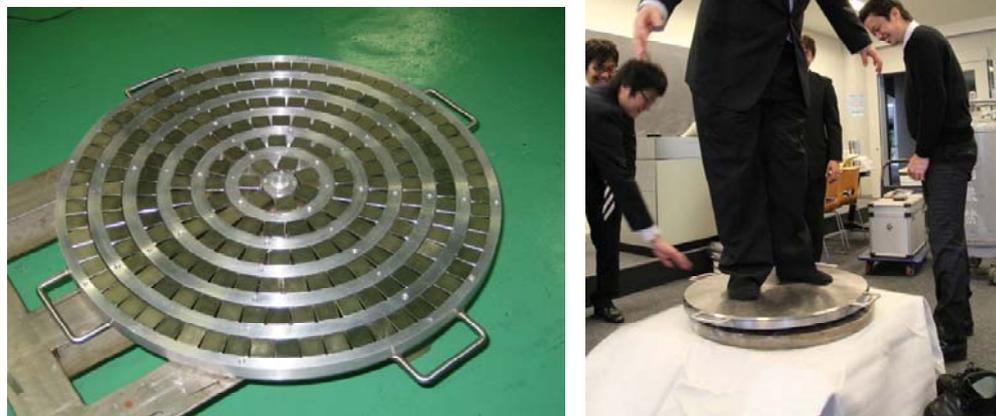


図 2-5-3 (左図) 超電導フライホイール磁石と (右図) 磁気浮上の様子

## 最終章 全体総括

### 1. サポイン全期間における成果総括

超電導バルク体はネオジム磁石の何十倍もの磁場源として使用できるため、再生医療や水質浄化システム、フライホイールなどへの活用が期待されているが、脆く壊れやすいという欠点がある。当社が取り扱っている鉄系形状記憶合金は3%程度の形状回復ひずみを示すため、これをリング状に加工し、円盤状のバルク体を外周部から締め付けることによって脆いバルク体の補強に活用するという、部材の結合技術の高度化を行なうことによりこの問題を解決することを目標とした。加えて、超電導バルク体の値段が高いことも超電導バルク体を用いた応用開発の進まない大きな要因となっている。このため、安価な原料を用いて特性の良い超電導バルク体の作製技術の開発を合わせて実施し、壊れにくい実用的な超電導バルク体を開発した。

3鋼種に対して丸棒試験片およびリング試験片を用いてそれぞれの鋼種の機械的特性及び形状回復特性、トレーニング効果、変態点を調べた結果、Fe- 28wt%Mn- 6wt%Si- 5wt%Cr 鉄系形状記憶合金が最も優れていることを判断し、この鋼種において最適な拡張ひずみ量や形状回復温度を得ることができた。

また、超電導バルク体においては安価なレアアースであるイットリウム (Y) を主とした Y-Ba-Cu-O 系でバルク体を製作し、特性に及ぼす酸素アニール処理温度と時間の最適化を行い、また、超電導バルク体としては大型な  $\phi 60$  のバルク体の試作に成功し作製条件を得た。また、当初 77K で 0.7T 以上の捕捉磁場を有する超電導バルク体の開発を目標としていたが、これらの工夫の結果、最終的に 40mm の円盤形状の単結晶超電導バルク体の最大捕捉磁場は 9,850G を達成した。

超電導バルク体に対して、鉄系形状記憶リングで締結補強を行った結果、42K という極低温環境下においてリング締結したバルク体は 46,000G もの磁場を捕捉し、また、鉄系形状記憶合金リングで締付けたバルク体は高温環境下 (850°C) から急冷 (-196°C) を行なっても破壊しないことを確認した。高さ 42mm のリングを用い、4 個の超電導バルク体を連結して締め付けることに成功した。また、重ねあわせたバルク体の捕捉磁場は 1.36 倍向上することを確認した。補助治具を用い、肉厚 1.5mm の薄肉リングを拡張できる補助治具を考案した。シリコン樹脂でコーティングすることにより、腐食に強いバルク体を開発した。

鉄系形状記憶合金で補強された超電導バルク体を計 6 機関 (香川高等専門学校、株式会社中信理化製作所、有限会社マグネオ技研、セイコー化工機株式会社、日本科学未来館、芝浦工業大学) に外部評価を依頼した。この結果、全ての機関において、浮上高さ (12mm 以上) や安定回転特性 (3,000rpm 以上) など、それぞれの要求を満足する評価が得られた。これにより、教材としての販売や、超電導回転機器などで採用してもらえる目処を得た。また、アキシアル型超電導フライホイールシステムの浮上用磁石として本サンプル品を評価した結果、150kg (磁石重さを含む) もの物体を高さ 20mm 以上持ち上げることができ、鉄系形状記憶合金リングで補強した超電導バルク体は超電導フライホイー

ル用浮上磁石として十分に使用可能であることを確認した。

## 2. 研究開発後の課題・事業化展開

### 1) 補完研究の実施体制における課題と対処

本サポインで計画したすべての目標に対してこれを達成することができた。しかしながらまだ超電導バルク体を作製するにあたり、性能のばらつきが発生している。当面はこのばらつきの原因を明確にし、より高レベルの性能が安定して得られる製造条件の検討を行う予定である。

### 2) 製品・技術の生産・普及体制における課題と対処

外部評価を依頼した川下企業を中心に、今後は有償でサンプル品を購入してもらい、その反応を見ながら当社の超電導バルク関係の事業をどのように展開するのが良いか、また展開できるのかを検討したい。そのため一定期間を限って試用販売期間を設定し、これまでに既につながりのある川下企業からの情報を中心に市場情報を収集し、早期の事業展開に結びつけたい。

### 3) 販路開拓における課題と対処

これまでも芝浦工大の村上学長の人的ネットワークを活用させてもらいながら本開発を進めてきた。今後も引き続き村上学長の支援を受けながら、それに加えて試用販売期間を通して当社独自の情報収集も行い、有効性が確認できれば、低温学会の展示会やネットなどでのPR活動も追々実施していくつもりである。

## サポイン成果

国際学会による発表 3 件

[S1] H. Seki, A. Wongsatanawarid, Y. Shimpō, M. Murakami, H. Sakai, T. Kurita and T. Maruyama

“Effects of reinforcement with Fe-Mn-Si shape memory alloy ring on mechanical and magnetic properties of bulk Y-Ba-Cu-O superconductors”

PASREG2010 (Processing and Applications of Superconducting (RE)BCO large Grain materials), Washington D.C. (USA), 2010 年 7 月 29-31 日

[S2] H. Seki, M. Murakami

“Reinforcement of bulk superconductor using shape memory alloy ring”

5th SEATUC(Southeast Asian Technical University Consortium) Symposium, Hanoi (Vietnam) 2011 年 2 月 24-25 日

[S3] H. Seki, Y. Honma, M. Nomura, C. Nakayama, N. Koshizuka, T. Maruyama, M. Murakami

“Reinforcement of Bulk Y-Ba-Cu-O Superconductors by using Fe-Mn-Si-Ni Shape Memory Alloy Rings”

24th International Symposium on Superconductivity, Funabori (Japan) 2011 年 10 月 24-26 日

表 1 サポイン期間中に依頼した特許 4 件

No	出願番号	公開番号	発明の名称	発明者	代理人
1	2011-80348 (2011.03.31)	2012-214329	超伝導バルク体とその製造方法および超伝導バルク磁石	村上雅人 (芝浦工大) 腰塚直己 中山千秋 関 宏範 丸山忠克 (淡路マテリア) 栗田孝	特許事務所サイクス 釜田淳爾弁理士
2	2012-75571 (2012.03.29)		超電導バルク体の皮膜形成剤、超電導バルク体用皮膜、並びに皮膜を有する超電導バルク体および超電導バルク磁石	関 宏範 (淡路マテリア) 皆川俊一 豊田豪紀 河崎慎司 村上雅人 (芝浦工大) 腰塚直己 中山千秋	特許事務所サイクス 釜田淳爾弁理士
3	2012-82224 (2012.03.30)		超電導バルク体および超電導バルク磁石	関 宏範 (淡路マテリア) 野村美樹 皆川俊一 河崎慎司 村上雅人 (芝浦工大) 腰塚直己 中山千秋	特許事務所サイクス 釜田淳爾弁理士
4	2013-004900 (2013.01.15)		超電導バルク体および超電導バルク磁石	関 宏範 (淡路マテリア) 野村美樹 豊田豪紀 河崎慎司 村上雅人 (芝浦工大) 腰塚直己 中山千秋	特許事務所サイクス 釜田淳爾弁理士