

## 平成23年度科学研究費補助金（特別推進研究）自己評価書 〔追跡評価〕

◆記入に当たっては、「平成23年度科学研究費補助金（特別推進研究）自己評価書等記入要領」を参照してください。

平成23年5月25日現在

<b>研究代表者 氏名</b>	山本 明	<b>所属研究機関・ 部局・職</b>	高エネルギー加速器研究機構・超伝導 低温工学センター・教授
<b>研究課題名</b>	南極周回飛翔・超伝導スペクトロメータによる宇宙起源反粒子の精密探査		
<b>課題番号</b>	13001004		
<b>研究組織 (研究期間終了時)</b>	研究代表者 山本 明（高エネルギー加速器研究機構・超伝導低温工学センター・教授） 研究分担者 吉田 哲也（高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・助教授：現宇宙科学研究所・教授） 野崎 光昭（神戸大学・大学院自然科学研究科・教授：現高エネルギー加速器研究機構教授）		

### 【補助金交付額】

年度	直接経費
平成13年度	68,000 千円
平成14年度	83,000 千円
平成15年度	97,300 千円
平成16年度	87,000 千円
平成17年度	88,000 千円
総計	423,300 千円

## 1. 特別推進研究の研究期間終了後、研究代表者自身の研究がどのように発展したか

特別推進研究によってなされた研究が、どのように発展しているか、次の(1)～(4)の項目ごとに具体的かつ明確に記述してください。

### (1) 研究の概要

(研究期間終了後における研究の実施状況及び研究の発展過程がわかるような具体的内容を記述してください。)

特別推進研究のなかで実現した『超伝導スペクトロメータによる南極周回気球実験(第1回、平成16年:2004年)』での太陽活動中間期における宇宙線観測、宇宙起源反粒子の探索の成功を基盤として、さらに科学研究費・基盤研究Sの支援を得て、以下の通り研究が飛躍的に発展した。

- ・ 平成18～19年度(2006～7年度): 第1回南極気球実験に用いられ、回収された観測装置の性能評価をもとに、観測装置の更なる高性能化を計った。
- ・ 平成19～20年度(2007～8年度): 太陽活動極小期を捉えた第2回南極周回気球実験に成功した。南極大陸を1.5周回飛行し、25日間に亘る連続観測を実現し、『太陽活動極小期、磁力線が鉛直となる極地長時間観測、大立体角』の3条件をあわせた究極的な高感度観測(BESS-Polar-II)実験に成功した。
- ・ 平成20～22年度(2008～2010年度): 観測装置の回収と併行してデータ解析を進め、以下を明らかにした。
  - 宇宙線低エネルギー反陽子エネルギースペクトルの精密観測結果から、宇宙線反陽子の主たる起源が陽子・陽子(星間物質)衝突による二次起源粒子であることを明確にし、その様々なモデル計算のなかから、実験に基づく観測精度を基に、整合するモデル計算に制限を与えた。
  - 宇宙起源反粒子の候補として、S. Hawkingによって予言されてきた原始ブラックホール(PBH)の蒸発を起源とする宇宙線反陽子が低エネルギー領域で観測されず、存在の可能性を、7シグマ以上の偏差で、否定する結論を得た。
  - 宇宙における物質・反物質の非対称性の検証を進め、反ヘリウム核に焦点をあてた反物質探索の結果、反ヘリウム/ヘリウム核比の上限値として、 $10E-7$ 以下( $10E-8$ の感度レベル)の結果を得た。この結果は、BESS実験が始まる以前に比べ、二桁以上、探索感度を深めたことになる。

特別推進研究を基にした研究の発展、成果の進展は、超伝導技術および宇宙科学実験の両分野における権威ある国際会議での招待講演(1-2)としても評価を受けるとともに、以下の第三者による評価・表彰を受けている。

- ・ IEEE Applied Superconductivity Award : (2008年、山本 明)  
素粒子、宇宙線、加速器における応用超伝導磁の開拓的貢献に対しての受賞  
(素粒子加速器実験、BESS気球実験用アルミ安定化薄肉超伝導磁石の開発を含む)
- ・ NASA Group Achievement Award (2009年、BESS国際気球実験チームとして受賞  
世界最高の宇宙線反物質観測データを提供したBESS-Polar観測装置の開発と  
30日間に亘る南極気球飛行、(25日間に亘る)観測の達成)
- ・ 超伝導科学技術賞・特別賞(2010年、山本 明)  
素粒子・宇宙線・加速器科学分野における超伝導技術の開発
- ・ 東京大学理学研究科・研究奨励賞(2011年、坂井賢一)  
『南極周回気球実験による太陽活動極小期の宇宙線反陽子スペクトラム測定』を研究課題とする坂井賢一氏(東京大学)の博士論文・成果による受賞(指導教員;山本 明)。

『超伝導スペクトロメータを用いた宇宙起源反粒子探索実験』は、1980年代より様々なカテゴリーで科学研究費、宇宙科学技術開発研究基金等の支援を受け発展し、その集大成としての『太陽活動極小期における南極での長時間観測実験』が科学研究費特別推進研究として支援を受けた。さらに科学研究費・基盤研究Sの支援を頂き、研究が飛躍的に発展し、BESS実験開始以来20年以上におよぶ積み重ねを経て、上記の結論を導くことができた。この研究を通して培われた『超伝導スペクトロメータ技術』、『先進的アルミ安定化超伝導磁石技術』は、エネルギーフロンティアを担う高エネルギー物理実験、宇宙科学実験における究極的な、『透明な磁場環境技術』として評価され、今後宇宙空間利用における活用の道を切り開く成果となった。

## 1. 特別推進研究の研究期間終了後、研究代表者自身の研究がどのように発展したか（続き）

(2) 論文発表、国際会議等への招待講演における発表など（研究の発展過程でなされた研究成果の発表状況を記述してください。）

## 論文発表：

1. Y.Makida, T.Kumazawa, K.Tanaka, H.Fuke, A.Yamamoto, and T.Yoshida, “Ballooning of an ultra-thin superconducting solenoid for particle astrophysics”, □IEEE Trans. Applied Superconductivity 16 (2006) 477-480.
2. A.Yamamoto, K.Abe, H.Fuke, S.Hainoa, T.Hams, K.Kim, M.H.Lee, Y.Makida, S.Matsuda, J.W.Mitchell, A.Moiseev, J.Nishimura, M.Nozaiki, R.Orito, S.Orito, J.F.Ormes, K.Sakai, T.Sanuki, M.Sasaki, E.S.Seo, Y.Shikaze, R.E.Streitmatter, J.Suzuki, K.Tanaka, N.Thakur, T.Yamagami, T.Yoshida and K.Yoshimura, “The BESS Program”, □Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) 166 (2007) 62-67.
3. Y.Makida, R.Shinoda, J.Suzuki, K.Tanaka, A.Yamamoto, and S.Mizumaki, “Cryogenic performance of ultra-thin superconducting solenoids for cosmic-ray observation with ballooning”, □IEEE Trans. Applied Superconductivity 17 (2007) 1205-1208.
4. A.Yamamoto, K.Abe, H.Fuke, S.Haino, T.Hams, M.Hasegawa, A.Horikoshi, K.C.Kim, A.Kusumoto, M.H.Lee, Y.Makida, S.Matsuda, Y.Matsukawa, J.W.Mitchell, A.Moiseev, J.Nishimura, M.Nozaiki, R.Orito, S.Orito, J.F.Ormes, K.Sakai, T.Sanuki, M.Sasaki, E.S.Seo, Y.Shikaze, R.Shinoda, R.E.Streitmatter, J.Suzuki, K.Tanaka, N.Thakur, T.Yamagami, T.Yoshida and K.Yoshimura, “Search for primordial antiparticles with BESS”, □Adv. Space Res. 42 (2008) (3)442-(3)449.
5. M.Sasaki, S.Haino, K.Abe, H.Fuke, T.Hams, K.C.Kim, M.H.Lee, Y.Makida, S.Matsuda, J.W.Mitchell, A.A.Moiseev, J.Nishimura, M.Nozaiki, S.Orito, J.F.Ormes, T.Sanuki, E.S.Seo, Y.Shikaze, R.E.Streitmatter, J.Suzuki, K.Tanaka, T.Yamagami, A.Yamamoto, T.Yoshida and K.Yoshimura, “Search for antihelium: Progress with BESS”, Adv. Space Res. 42 (2008) (3)450-(3)454.
6. K.Yoshimura, K.Abe, H.Fuke, S.Haino, T.Hams, M.Hasegawa, A.Horikoshi, K.C.Kim, T.Kumazawa, A.Kusumoto, M.H.Lee, Y.Makida, S.Matsuda, Y.Matsukawa, J.W.Mitchell, A.A.Moiseev, J.Nishimura, M.Nozaiki, R.Orito, J.F.Ormes, K.Sakai, M.Sasaki, E.S.Seo, Y.Shikaze, R.Shinoda, R.E.Streitmatter, J.Suzuki, K.Takeuchi, N.Thakur, K.Tanaka, T.Yamagami, A.Yamamoto and T.Yoshida, “BESS-Polar experiment: Progress and future prospects”, Adv. Space Res. 42 (2008) (10)1664-(10)1669.
7. K.Abe, H.Fuke, S.Haino, T.Hams, A.Itazaki, K.C.Kim, T.Kumazawa, M.H.Lee, Y.Makida, S.Matsuda, K.Matsumoto, J.W.Mitchell, A.A.Moiseev, Z.Myers, J.Nishimura, M.Nozaiki, R.Orito, J.F.Ormes, M.Sasaki, E.S.Seo, Y.Shikaze, R.E.Streitmatter, J.Suzuki, Y.Takasugi, K.Takeuchi, K.Tanaka, T.Yamagami, A.Yamamoto, T.Yoshida, K.Yoshimura, Measurement of the cosmic-ray low energy antiproton spectrum with the first BESS-Polar antarctic flight”, Phys. Lett. B 670 (2008) 103-108.
8. Y.Makida, A.Yamamoto, K.Yoshimura, K.Tanaka, J.Suzuki, S.Matsuda, M.Hasegawa, A.Horikoshi, R.Shinoda, K.Sakai, S.Mizumaki, R.Orito, Y.Matsukawa, A.Kusumoto, J.W.Mitchell, R.E.Streitmatter, T.Hams, M.Sasaki, and N.Thakur, “The BESS-Polar ultra-thin superconducting solenoid magnet and its operational characteristics during long-duration scientific ballooning over antarctica”, □IEEE Trans. Applied Superconductivity 19 (2009) 1315-1319.

## 国際会議招待講演：

1. A.Yamamoto: Search for primordial antiparticle with BESS □36th COSPAR Scientific Assembly (July 2006) Beijing.
2. A.Yamamoto: Balloon-borne Experiment with Superconducting Spectrometer (BESS) □Intl. Workshop on Cosmic-rays and High Energy Universe (Mar 2007) Aoyama Gakuin Univ.
3. J.W.Mitchell, A.Yamamoto et al.: Solar Modulation of Low-Energy Antiproton and Proton Spectra Measured by BESS □30th Intl. Cosmic Ray Conf. (July 2007) Merida.
4. K.Yoshimura, A.Yamamoto et al.: Progress of BESS-Polar Experiment □Intl. Workshop on Advances in Cosmic Ray Science (Mar. 2008) Waseda Univ.
5. J.W.Mitchell and A.Yamamoto: The BESS investigation of the origin of cosmic-ray antiprotons and search for cosmological antimatter □37th COSPAR Scientific Assembly (July 2008) Montreal
6. J.W.Mitchell, and A.Yamamoto: The BESS Search for Cosmic-ray Antiproton Origins and for Cosmological Antimatter (Highlight Talk) □31th Intl. Cosmic Ray Conf., (July 2009) Łódź
7. A.Yamamoto: Search for primordial antiparticle in cosmic rays with the BESS, □The 7th RESCEU International Symposium on Astroparticle Physics and Cosmology (Nov. 2009) Univ. of Tokyo
8. K.Yoshimura, A.Yamamoto, and J.W. Mitchell: Search for Cosmic-ray Antiproton Origins and for Cosmological Antimatter with BESS □38th COSPAR Scientific Assembly (July 2010) Bremen
9. K.Yoshimura, A.Yamamoto et al.: Precision Measurement of Cosmic-ray Antiproton Spectrum and Search for Antimatter with BESS, 10th international conference on Low Energy Antiproton Physics (April, 2011) Canada.
10. A.Yamamoto: Search for Cosmic-Ray Antiproton Origins and for Cosmological Antimatter with BESS, The 20th European Space Agency Symposium (May 2011) Hyeres.

## 1. 特別推進研究の研究期間終了後、研究代表者自身の研究がどのように発展したか（続き）

### (3) 研究費の取得状況（研究代表者として取得したもののみ）

取得した研究費：科学研究費基盤研究 S（平成 18 年度～平成 21 年度，22 年度に繰り越し）  
 課題名：『南極周回飛翔超伝導スペクトロメータによる太陽活動極小期の宇宙起源反粒子探査』  
 研究代表者： 山本 明（本人：高エネルギー加速器研究機構）

概要：本基盤研究 S のサポートを得たことにより、特別推進研究のなかで成功した第 1 回南極周回気球実験成果を基に、更なる観測装置の高性能化を進め、太陽活動極小期を迎えた 2007 年に、第 2 回南極周回気球観測実験を成功させ、研究を飛躍的に発展させた。南極大陸を 2 周回飛翔し、20 日間以上の観測を実現し、『太陽活動極小期、地球磁力線が鉛直となる極地における長時間観測、大立体角』の 3 条件をあわせた究極的な高感度観測 (BESS-Polar-II) 実験に成功した。

### (4) 特別推進研究の研究成果を背景に生み出された新たな発見・知見

- ・ 本特別推進研究の成果を背景に、基盤研究 S によって、第 2 回南極周回飛翔気球実験による長時間宇宙線観測が実現するとともに、データ解析を進め、以下を明らかにした。
  - 宇宙線低エネルギー反陽子エネルギースペクトルの精密観測結果から、宇宙線反陽子の主たる起源が陽子・陽子（星間物質）衝突による二次起源粒子であることを明確にし、その様々なモデル計算のなかから、実験に基づく観測精度を基に、整合するモデル計算に制限を与えた。
  - 宇宙起源反粒子の候補として、S. Hawking によって予言されてきた原始ブラックホール (PBH) の蒸発を起源とする宇宙線反陽子が低エネルギー領域で観測される可能性を、7 シグマ以上の誤差分離で、否定する結論を得た。
  - 宇宙における物質・反物質の非対称性の検証を進め、反ヘリウム核に焦点をあてた反物質探索の結果、反ヘリウム/ヘリウム核比の上限値として、 $10E-7$  以下 ( $10E-8$  レベル) の結果を得た。この結果は、BESS 実験が始まる以前に比べ、二桁以上、探索感度を深めたことになる。
- ・ これらの成果は、本計画で培った超伝導スペクトロメータ技術と南極実験、太陽活動の極小期を捉える観測の全ての条件を満たすことができ始めて実現した精密観測、高い統計精度に基づくものであり、宇宙線物理学、宇宙線の起源の研究に、信頼性の高い実験結果と、新たな知見をもたらした。

## 2. 特別推進研究の研究成果が他の研究者により活用された状況

特別推進研究の研究成果が他の研究者に活用された状況について、次の(1)、(2)の項目ごとに具体的かつ明確に記述してください。

### (1) 学界への貢献の状況（学術研究へのインパクト及び関連領域のその後の動向、関連領域への関わり等）

#### 宇宙線物理学、素粒子物理学への貢献：

- ・ 『高精度かつ大面積立体角を有する超伝導スペクトロメータ』、『南極周回による長時間観測』、『太陽活動極小期の観測』の三つの条件を満たす宇宙線観測気球実験の成功によって、宇宙線中に微量に含まれる低エネルギー (< 1 GeV) 反陽子エネルギースペクトラムを、これまでより一桁以上高い圧倒的な統計精度でスペクトラムを決定する成果を得た。この結果、宇宙線の生成、伝播モデルの精密な考察に、極めて精度の高い観測結果を提供した。この成果は、宇宙線物理学における大きなテーマであった宇宙線反陽子の起源、二次粒子流束モデルに明確な制約を与え、宇宙線物理学における主テーマに深く貢献した。
- ・ S. Hawking が提唱し、宇宙初期過程における密度揺らぎから生成されたとされる原始ブラックホールを起源とする反陽子存在の可能性について、2007～2008年太陽活動極小期における観測結果として、上限値  $R = 1.0 \times 10^{-3} \text{ pc}^{-3} \text{ yr}^{-1}$  (90% C.L.) を結論とし、20年以上に亘り未解決であった素粒子物理学、宇宙線物理学のテーマに明確な結論を提供した。
- ・ 宇宙における物質、反物質の非対称性の検証を、大型加速器による実験とは相補的な立場で、宇宙線観測を通して、直接的に反物質探索を進めた結果、反ヘリウム/ヘリウム比の上限値として、 $7 \times 10^{-8}$  をえた。

#### 超伝導応用への貢献：

- ・ 磁場を応用する基礎物理学、また飛翔体等を用いた磁場環境利用において、磁石を形成する物質を限りなく低減し、純粋な磁場空間のみを求めることは、究極的な目標となる。
- ・ 本研究のなかで進めた『飛翔体応用を目指した薄肉・軽量超伝導磁石』の開発は、高強度アルミ安定化材の開発を幹とする技術開発によって、今後の超伝導応用展開に新たな道を拓いた。この超伝導磁石の開発は、日本宇宙フォーラムの支援も受けて進められ、超伝導コイルの製法は特許（登録：2008年5月2日、特許第4117372号：『超伝導コイル』発明者：山本 明、槇田康博）としても認定されている。
- ・ 宇宙空間における強磁場環境の利用は、宇宙科学観測における活用はもとより、無重力状態と合わせ、宇宙空間での様々な理工学実験に新たな展開をもたらす。また、磁気エネルギー貯蔵、電磁推進、宇宙空間における異常磁気嵐等があった場合の宇宙飛行士の放射線被爆防止シェルター（磁場による荷電粒子線の遮蔽）など、広い応用をもたらす。エネルギー制約の厳しい宇宙空間において、超伝導技術の応用展開は不可欠であり、本特別推進研究は、宇宙空間に於ける強磁場利用を実現、その有効性を実証する役割を果たし、強磁場環境を超伝導技術によって宇宙空間に実現する道を切り拓いた。

## 2. 特別推進研究の研究成果が他の研究者により活用された状況（続き）

(2) 論文引用状況（上位10報程度を記述してください。）

## 【研究期間中に発表した論文】

No	論文名	日本語による簡潔な内容紹介	引用数
1	“A thin superconducting solenoid magnet for particle astrophysics”, A.Yamamoto, Y.Makida et al., □IEEE Trans. Applied Superconductivity 12 (2002) 438-441.	宇宙飛行体搭載型薄肉超伝導磁石開発の提案を纏めた論文。BESS 気球実験の基盤技術の提案をおこなう。	> 20
2	”BESS and its future prospect for polar long duration flights”, A.Yamamoto et al., Adv. Space Res. 30 (2002) (5)1253-(5)1262.	BESS-Polar 超伝導スペクトロメータおよび南極周回気球実験の全体構想を提案。	> 20
3	□”BESS-Polar: long duration flights at Antarctica to search for primordial antiparticles”, A.Yamamoto, et al., □Nucl. Phys. B (Proc.Suppl.) 113 (2002) 208-212.	BESS-Polar 超伝導スペクトロメータの開発と実験準備を述べる。	> 5
4	”Progress of the BESS superconducting spectrometer”, S.Haino, A. Yamamoto et al., Nucl. Instr. and Methods A 518 (2004) 167-171	BESS 超伝導スペクトロメータの開発進展を報告。	> 5
5	BESS-Polar experiment”, T.Yoshida, A.Yamamoto et al., □Adv. Space Res. 33 (2004) (10)1755-(10)1762.	BESS-Polar 実験の実験準備の進捗を報告。	> 5
6	”BESS-Polar”, M.Nozaki for the BESS Collaboration, □Nucl. Instr. and Methods B 214 (2004) 110-115.	BESS-Polar 実験の進捗を報告。	> 5
7	“Measurements of primary and atmospheric cosmic-ray spectra with the BESS-TeV spectrometer”, S.Haino, A. Yamamoto et al., Phys. Lett. B 594 (2004) 35-46.	BESS 気球実験における一次宇宙線陽子、大気宇宙線の精密観測の報告。BESS-Polar 実験の基礎を築く実験報告。	> 10
8	“The BESS program”, J.W.Mitchell, A.Yamamoto et al., □Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) 134 (2004) 31-38.	BESS 実験の進展を報告。	> 10
9	”Precise measurement of the cosmic ray antiproton spectrum with BESS including the effects of solar modulation”, J.W.Mitchell, A.Yamamoto, T.Yoshida et al., Adv. Space Res. 35 (2005) (1)135-(1)141.	<b>太陽活動の影響を含む宇宙線反陽子観測成果を纏めた。</b>	> 10
10			

【研究期間終了後に発表した論文】			
No	論文名	日本語による簡潔な内容紹介	引用数
1	"The first BESS-Polar flight over antarctica", K.Yoshimura, A.Yamamoto et al., Proc. 25th Intl. Symposium Space Technology and Science (Kanazawa) (2006) 1132-1137.	BESS-Polar 第一回南極気球実験の進捗報告	> 10
2	"Ballooning of an ultra-thin superconducting solenoid for particle astrophysics in Antarctica", Y.Makida, T.Kumazawa, K.Tanaka, H.Fuke, A.Yamamoto, and T.Yoshida □IEEE Trans. Applied Superconductivity 16 (2006) 477-480.	宇宙物理学実験の為に超薄肉超伝導ソレノイド磁石の南極における気球飛翔実験	> 10
3	"The BESS Program", A.Yamamoto et al., □Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.) 166 (2007) 62-67.	南極を含む BESS 気球実験の進捗報告 20 年間に亘る実験の発展を纏める。	> 10
4	"Search for primordial antiparticle with BESS", A.Yamamoto, et al., □Adv. Space Res. 42 (2008) (3)442-(3)449.	BESS 気球実験による原始ブラックホールを起源とする反粒子の探索実験の進捗 南極周回観測による探索感度の飛躍的進展を報告。	> 5
5	"Search for antihelium; progress with BESS", M.Sasaki,A.Yamamoto et al., □Adv. Space Res. 42 (2008) (3)450-(3)454.	BESS 気球実験による原始ブラックホールを起源とする反ヘリウム探索実験の進捗 南極周回観測による感度の飛躍的進展を報告。	> 10
6	"BESS-Polar experiment: Progress and future prospects", K.Yoshimura,A.Yamamoto et al., □Adv. Space Res. 42 (2008) (10)1664-(10)1669.	BESS-Polar 実験の進捗と将来展望を述べる。	> 5
7	"Measurement of the cosmic-ray low-energy antiproton spectrum with the first BESS-Polar antractic flight", K.Abe, A.Yamamoto et al., □Phys. Lett. B 670 (2008) 103-108.	第 1 回南極周回気球実験による反陽子スペクトルの観測結果をまとめた論文。太陽活動中間期における観測結果であり、太陽活動極小期の観測を目指した第 2 回観測との比較において基準となる観測結果。	> 30
8	"The BESS-Polar ultra-thin superconducting solenoid magnet and its operational characterises during long-duration scientific flight over antarctica", Y.Makida, A.Yamamoto, IEEE Trans. Applied Superconductivity 19 (2009) 1315-1319.	BESS-Polar 薄肉超伝導ソレノイド磁石の南極飛翔実験における運転特性をまとめた技術報告。	> 5
9	"Search for Cosmic-ray Antiproton Origins and for Cosmological Antimatter with BESS", A.Yamamoto <sup>a</sup> et al., to be published in Adv. Space Res	太陽活動極小期に実現した第 2 回南極周回気球観測実験における宇宙線反陽子の精密観測、反ヘリウム核の探索結果をまとめた報告。	TBD
10			

### 3. その他、効果・効用等の評価に関する情報

次の(1)、(2)の項目ごとに、該当する内容について具体的かつ明確に記述してください。

#### (1) 研究成果の社会への還元状況（社会への還元の程度、内容、実用化の有無は問いません。）

##### 素粒子物理学、宇宙線物理学への還元

・本研究における宇宙線の精密観測を通して、信頼性が高い標準的となり得る観測データを提供し、学術的社会貢献、還元を果たしている。

##### 超伝導応用、社会への還元状況：

磁場を応用する基礎物理学、また飛翔体等を用いた磁場環境利用において、磁石を形成する物質を限りなく低減し、純粋な磁場空間のみを求めることは、究極的な目標となる。本研究のなかで進めた『飛翔体応用を目指した薄肉・軽量超伝導磁石』の開発は、純金属アルミニウムに特定の異種金属を微量添加し、機械加工硬化を加える手法による高強度アルミ安定化材の開発を幹とする技術開発であった。この結果、今後の飛翔体、輸送機器等、軽量化を求められる超伝導応用展開に新たな道を拓いた。この超伝導磁石開発は、本特別推進研究に先立ち、日本宇宙フォーラムの支援を受けて始められ、本研究のなかで、完成した技術となった。超伝導コイルの製法は特許（登録：2008年5月2日、特許第4117372号：『超伝導コイル』発明者：山本 明、榎田康博）としても認定され、工業技術として、社会への還元を果たしている。

### 3. その他、効果・効用等の評価に関する情報（続き）

#### (2) 研究計画に関与した若手研究者の成長の状況（助手やポスドク等の研究終了後の動向を記述してください。）

本研究は、気球実験の特色を活かし、若手研究者、特に大学院学生が主役となった実験的研究であった。本研究で博士号を取得した学生は、その課程で、実験装置の起案、開発、気球実験への取り組み、観測、データ解析を、くまなく経験し、実力を培う機会を得ている。彼らの進路は、

大学、研究機関： 東京大学、JAXA/ISAS、INFN-Perugia 等、、

企業： KK 東芝、日立製作所、他各企業

等に展開し、科学技術の最前線で活躍をしている。