

## 研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名：超伝導ナノファブリケーションによる新奇物性と応用
2. 研究代表者名及び主たる研究参加者名(研究機関名・職名は研究参加期間終了時点)

### 研究代表者

石田 武和 (大阪府立大学大学院工学研究科 教授)

### 主たる共同研究者

四谷 任 (大阪府立産業総合技術研究所 部長 (平成14年11月～20年3月))

王 鎮 (情報通信研究機構 未来ICT研究センター グループリーダー (平成14年11月～20年3月))

北條 喜一 (日本原子力研究開発機構先端基礎研究センター研究推進室長 (平成14年11月～20年3月))

加藤 勝 (大阪府立大学大学院工学研究科 准教授 (平成14年11月～20年3月))

町田 昌彦 (日本原子力研究開発機構 システム計算科学センター シミュレーション技術開発室長  
(平成14年11月～20年3月))

小山富男 (東北大学金属材料研究所 助教 (平成14年11月～20年3月))

海老澤 丕道 (東北大学大学院情報科学研究科 名誉教授 (平成15年11月～20年3月))

林 正彦 (秋田大学教育文化学部 准教授 (平成15年11月～20年3月))

### 3. 研究内容及び成果

#### 3-1. 研究実施および成果の概要

本研究では、 $MgB_2$  の高品質薄膜の開発と微細加工による中性子検出器の実現とその基礎として  $MgB_2$  の物性研究、dドット(s波マトリックス-d波超伝導ドット)系の実証、および超伝導微細系での磁束系での新奇秩序状態をターゲットして研究を推進し、次の主要成果を得た。

**$MgB_2$  センサによる中性子線の検出** : 本研究で開発した  $MgB_2$  中性子検出器を用いて、日本原子力研究開発機構の所有する研究炉 JRR-3M で中性子線検出の実証試験を行い、半値幅1.3ns、ノイズレベル $\pm 1$ mV で中性子線の測定に成功した。この  $MgB_2$  中性子検出器は、従来の中性子検出器と比べて3桁以上高速で作動し、世界で一番高速で動作する中性子検出器であることを実証した。

**高品質  $MgB_2$  薄膜の作製** : 共蒸着成膜チャンバー等の設備改造を行い、300 以上の高い基板温度において高いMg成膜レートが達成でき、高基板温度で転移開始温度  $T_c = 37.3$  K の高品質  $MgB_2$  薄膜を作製することに成功した。

**$MgB_2$ /AIN/ $MgB_2$ トンネル接合の開発** : 絶縁層にAIN薄膜を用いて  $MgB_2$ /AIN/ $MgB_2$  の接合の試作を行い、4.2Kにおいて明瞭な準粒子トンネリング特性と3.7 mV のギャップ電圧を観測した。

**$MgB_2$  センサによるアルファ線と20psパルスレーザの検出に成功** : 測定系のノイズ低減に努力し、超伝導転移温度近傍で $^{241}Am$ 放射性同位元素が崩壊するときに放出される約5MeVの線によるパルス信号の検出に初めて成功した。また、波長1.55  $\mu m$  の20psパルスレーザの検出に成功した。

**第一原理シミュレーションによる中性子検出過程の予測** :  $MgB_2$  検出器の中性子シグナルの検出過程の地球シミュレータによる大規模並列シミュレーションを実施し、シグナルの時間スケール、シグナルの温度変化、電流値依存性について定性的一致を確認した。

**二成分Ginzburg-Landau方程式によるdドットの定式化** : dドットは実験家により提唱されたが、その基礎理論はなかった。二成分Ginzburg-Landau方程式により半整数磁束発生の検証ができ、時間発展を入れることにより状態遷移を行う基礎理論を完成させた。

**dドットの量子ビットとしての基礎理論の構築** : dドットは、閉じた0- 接合系とみなすことができ、二

状態間に巨視的量子トンネル効果が生じれば、量子論的二準位系となるが、量子間トンネルが可能となることを示した。

超伝導ネットワークにおけるチェッカーボード磁束結晶： 正方格子超伝導ネットワークで磁束格子チェッカーボード結晶を発見した。チェッカーボード結晶は磁束量子のウィグナー結晶と位置づけられるが、非線形項を考慮した Ginzburg-Landau 方程式による数値計算と良い一致を示した。

超伝導ネットワークにおける周期的磁束量子ジャンプ： 蜂の巣格子超伝導ネットワークにおいて、各超伝導孔に整数倍磁束、さらに分数倍磁束が入った状態でマクロな磁化が急激に減少する現象を新たに発見し、擬周期的フラックスジャンプと名付けた。

SQUID 顕微鏡の高分解能化に関する理論的研究： SQUID 顕微鏡における観測画像を高解像度化するために、ノイズの強度についてアルゴリズムのパラメータを自動的に最適化する方法を考案し、超伝導ネットワークで実測された SQUID 顕微鏡データで、その有効性を実証した。

### 3 - 2 . グループの実施項目

#### 3 . 2 . 1 . 関西地区実験グループ (石田武和)

- ・大阪府立大学(OPU)サブグループ:超伝導ナノファブ리케이션による超伝導微細系の設計・製作と評価
- ・大阪府立産業技術総合研究所(TRI)サブグループ:電子ビーム露光装置を用いた超伝導体のナノ加工
- ・情報通信研究機構(NICT)サブグループ:高品質 MgB<sub>2</sub> 薄膜の作製及び中性子検出器開発

#### 3 . 2 . 2 . 原子力機構東海地区実験グループ (岡安 悟)

- ・MgB<sub>2</sub> 薄膜を用いた超伝導中性子センサの開発:MgB<sub>2</sub> の物質構成元素のホウ素の同位体 <sup>10</sup>B が中性子と高い確率で核反応 <sup>10</sup>B(n, γ)<sup>7</sup>Li を起こすことを利用した中性子センサの開発支援として、関西地区実験グループが作製した MgB<sub>2</sub> 薄膜素子を用い、放射線計測の専門家の立場から素子の評価を行い、MgB<sub>2</sub> センサ素子の設計にフィードバックする。MgB<sub>2</sub> 検出器の J-PARC での利用法について検討する。

#### 3 . 2 . 3 . 超伝導理論グループ (加藤 勝)

- ・スーパーコンピュータを用いた超伝導微細系の理論計算
  - 1)大阪府立大学大学院工学研究科サブグループ:スーパーコンピュータを用いた超伝導微細系(d-dot、超伝導微小板、超伝導ネットワーク)の理論計算
  - 2)日本原子力研究開発機構サブグループ:ナノ構造超伝導体数理モデルの構築と数値的研究によるデバイス提案
  - 3)東北大学金属材料研究所サブグループ:d波超伝導体ドットを用いた新しい量子デバイスの研究
  - 4)東北大学大学院情報科学研究科サブグループ:超伝導ナノ構造体の理論の構築と応用分野の開拓
  - 5)秋田大学教育文化学部サブグループ:超伝導ナノ構造体の磁束状態の理論構築と実験データ解析

### 4 . 事後評価結果

#### 4 - 1 . 外部発表(論文、口頭発表等)、特許、研究を通じての新たな知見の取得等の研究成果の状況

国際誌論文:100程度、口頭発表:161件(国内)、36件(国際会議)、招待講演:11件(国内)、44件(国際会議)という成果報告は十分な成果が得られた事を示している。

また知的所有権についても、国内特許出願5件、海外特許出願1件は十分な成果であると判断される。得られた研究成果の状況は以下の通りである。

MgB<sub>2</sub>中性子検出器を実際の中性子フラックス中で実証:

日本原子力開発機構の所有する研究炉JRR-3Mでの実証試験を行い、MgB<sub>2</sub>中性子検出器は、従来の中性子検出器と比べて3桁以上の速さも記録を更新し、世界で一番高速で動作する中性子検出器

であることを実証した。

表面平滑度の良いMgB<sub>2</sub>薄膜作製:

高い基盤温度(300 以上)で成膜出来るよう共蒸着成膜チャンバーの改造を行い、T<sub>c</sub>=37.3Kの高品質MgB<sub>2</sub>薄膜の作製に成功した。

MgB<sub>2</sub>導膜を使った積層型SIS接合の作製に成功:

絶縁層にAlN薄膜を用いてMgB<sub>2</sub>/AlN/ MgB<sub>2</sub>の接合の試作を行い、4.2Kにおいて明瞭な準粒子トンネリング特性と3.7mVのギャップ電圧を観測した。

MgB<sub>2</sub>センサによるアルファ線と20psパルスレーザーの検出に成功:

測定系のノイズ低減に努力し、超伝導転移温度近傍で<sup>241</sup>Am放射性同位元素が崩壊するときに放出される約5MeVの α線によるパルス信号の検出に初めて成功した。また波長1.55 μ mの20psパルスレーザーの検出に成功した。

中性子検出器開発のためのコンピュータ技術の開発:

MgB<sub>2</sub>中性子検出器の開発のために、時間異存ギンツブルク・ランダウ方程式、マックスウェル方程式、熱伝導方程式、の三連立微分方程式を解くシミュレーションコードを新たに開発し、地球シミュレータ(ES)級の大規模並列コンピュータでの並立実行を完了した。

その他dドットの研究については、実用化が見えるには、まだ道が遠いが新しい展開に先鞭をつけた。

#### 4 - 2 . 成果の戦略目標・科学技術への貢献

本事業は

我国で発見された新物質MgB<sub>2</sub>を次世代超伝導エレクトロニクスとして登場させるべく、高品質MgB<sub>2</sub>薄膜やMgB<sub>2</sub>接合の開発を行う。

MgB<sub>2</sub>検出の実用化を目指し、大強度パルス中性子源J-PARCでの応用を検討する。

dドットの半整数量子化磁束の検証と交換相互作用の解明により、超伝導エレクトロニクス応用、量子コンピュータQuビットモデルとしての展開を図る。

等の大変高い目標をめざして出発した研究チームである。従って実用化の“芽”をつくることが必要であり、どこまで達成できて、今後の発展のために何をすればよいかという総括が大変重要である。

以上の目標をふまえて本事業の科学技術への貢献は以下のようにまとめられる。まず一番大きな目標であるMgB<sub>2</sub>の中性子検出器については、ダイナミックレンジの広い中性子検出器による中性子検出には成功したが、「光」が見えた段階であり、実際の応用へのプロセスが不透明である。デバイス化に向けては未だ多くの克服すべき問題があり、特に感度についての更なる考察も必要と思われる。中性子検出器は、実際の中性子検出に使われ始めて貢献したことになるので、更なる継続研究に期待したい。

dドットについても、何らかの応用につながるのか、新たな学術分野を切り開くなどが見えないので、判断は時期尚早である。

本プロジェクトは前にも述べたように実用化のための「芽」を作る段階であり次のステップにすすむためには継続した研究活動や応用展開の活動が必要である。

#### 4 - 3 . その他の特記事項(受賞歴など)

本プロジェクトに関し、多くの賞を得られているのは、高く評価したい。しかし、ほとんどが学内の賞(府立大学学長顕彰など)であるのが気になるという一部の評価者の意見もあった。

研究の半分はMgB<sub>2</sub>の実用化という大変具体的なテーマであるが、残りの半分は設計手法に関する理論的研究である。これらの理論的研究は今後の超伝導デバイス開発に広く利用される可能性があるので今後期待したい。