



JP0650723

JAEA-Review

## 平成 17 年度～平成 21 年度 科学研究費補助金特別推進研究

### 「4 次元空間中性子探査装置の開発と酸化物高温超伝導機構の解明」

#### 平成 17 年度研究報告書

2005 Annual Report of MEXT Specially Promoted Research,  
"Development of the 4D Space Access Neutron Spectrometer (4SEASONS) and  
Elucidation of the Mechanism of Oxide High-T<sub>c</sub> Superconductivity"

新井 正敏 横尾 哲也\* 梶本 亮一 中島 健次

社本 真一 山田 和芳\* 藤田 全基\* 猪野 隆\*

曾山 和彦 中村 充孝 相澤 一也 大山 研司\*

平賀 晴弘\* 朝岡 秀人 樹神 克明 稲村 泰弘 今井 良宗

Masatoshi ARAI, Tetsuya YOKOO\*, Ryoichi KAJIMOTO, Kenji NAKAJIMA  
Shin'ichi SHAMOTO, Kazuyoshi YAMADA\*, Masaki FUJITA\*, Takashi INO\*  
Kazuhiko SOYAMA, Mitsutaka NAKAMURA, Kazuya AIZAWA, Kenji OHOYAMA\*  
Haruhiro HIRAKA\*, Hidehito ASAOKA, Katsuaki KODAMA, Yasuhiro INAMURA  
and Yoshinori IMAI

量子ビーム応用研究部門  
パルス中性子装置開発研究グループ

Pulsed Neutron Instrumentations Research Group  
Quantum Beam Science Directorate

本レポートは日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。  
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。  
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp/index.shtml>)  
より発信されています。このほか財団法人原子力弘済会資料センター\*では実費による複写頒布を行つております。

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4  
日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課  
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920

\* 〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4 日本原子力研究開発機構内

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency  
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to  
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,  
Japan Atomic Energy Agency  
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan  
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5901

平成 17 年度～平成 21 年度 科学研究費補助金特別推進研究  
「4 次元空間中性子探査装置の開発と酸化物高温超伝導機構の解明」

平成 17 年度研究報告書

日本原子力研究開発機構  
量子ビーム応用研究部門 中性子産業利用技術研究ユニット

新井 正敏・横尾 哲也\*・梶本 亮一・中島 健次・社本 真一<sup>+</sup>・山田 和芳\*\*・藤田 全基\*\*・  
猪野 隆\*・曾山 和彦・中村 充孝・相澤 一也・大山 研司\*\*・平賀 晴弘\*\*・朝岡 秀人<sup>+</sup>・  
樹神 克明<sup>+</sup>・稻村 泰弘\*・今井 良宗\*\*<sup>+</sup>

(2006 年 10 月 2 日受理)

平成 17 年度から平成 21 年度に亘り、「4 次元空間中性子探査装置の開発と酸化物高温超伝導機構の解明」を研究課題とする科学研究費補助金・特別推進研究が採択された（研究代表者・新井正敏）。本研究は大強度陽子加速器（J-PARC）の大強度パルス中性子源において、現在世界最高性能の非弾性散乱実験装置よりも二桁高い性能を有する実験装置、4 次元空間中性子探査装置（4SEASONS: 4d SpacE AccesS neutrON Spectrometer）を建設し、異常な磁気励起、フォノン異常現象を 3 次元の波数-エネルギーからなる 4 次元空間で詳細に観測することにより酸化物高温超伝導機構の解明を目指すものである。

本報告書は本研究の平成 17 年度における研究成果をまとめたものである。

---

原子力科学研究所（駐在）：〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

\* 博士研究員

<sup>+</sup> 中性子物質科学研究ユニット

\* 高エネルギー加速器研究機構

\*\* 東北大学金属材料研究所

2005 Annual Report of MEXT Specially Promoted Research,  
“Development of the 4D Space Access Neutron Spectrometer (4SEASONS) and  
Elucidation of the Mechanism of Oxide High- $T_c$  Superconductivity”

Masatoshi ARAI, Tetsuya YOKOO\*, Ryoichi KAJIMOTO, Kenji NAKAJIMA, Shin'ichi SHAMOTO<sup>+</sup>,  
Kazuyoshi YAMADA\*\*, Masaki FUJITA\*\*, Takashi INO\*, Kazuhiko SOYAMA,  
Mitsutaka NAKAMURA, Kazuya AIZAWA, Kenji OHOYAMA\*\*, Haruhiro HIRAKA\*\*,  
Hidehito ASAOKA<sup>+</sup>, Katsuaki KODAMA<sup>+</sup>, Yasuhiro INAMURA<sup>\*</sup> and Yoshinori IMAI<sup>\*\*+</sup>

Neutron Technology R&D Center, Quantum Beam Science Directorate

Japan Atomic Energy Agency

Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received October 2, 2006)

A research project entitled “Development of the 4D Space Access Neutron Spectrometer (4SEASONS) and Elucidation of the Mechanism of Oxide High- $T_c$  Superconductivity” has started in 2005 (repr. by M. Arai). It is supported by MEXT, Grant-in-Aid for Specially Promoted Research and is going to last until fiscal 2009. The goal of the project is to elucidate the mechanism of oxide high- $T_c$  superconductivity by neutron scattering technique. For this purpose, we will develop an inelastic neutron scattering instrument 4SEASONS (4d SpacE AccesS neutrON Spectrometer) for the spallation neutron source in Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC). The instrument will have 100 times higher performance than existing world-class instruments, and will enable detailed observation of anomalous magnetic excitations and phonons in a four-dimensional momentum-energy space.

This report summarizes the progress in the research project in fiscal 2005.

Keywords: High- $T_c$  Superconductivity, Spallation Neutron Source, J-PARC, Inelastic Neutron Scattering

---

\* Post-Doctoral Fellow

<sup>†</sup> Neutron Materials Research Center

\* High Energy Accelerator Research Organization

\*\* Institute for Materials Research, Tohoku University

## 目 次

1. 要旨	1
2. 研究目的	2
3. 研究の進展状況	4
3.1 4次元空間中性子探査装置（四季）の建設	4
3.2 試料作成環境の構築と試料作成	6
3.3 酸化物高温超伝導の実験研究	7
3.4 研究会・ワークショップ	7
4. これまでの研究成果	9
4.1 4次元空間中性子探査装置（四季）の建設	9
4.2 試料作成環境の構築と試料作成	9
4.3 酸化物高温超伝導の実験研究	9
4.4 研究発表リスト	12
5. 研究組織の役割分担	21
6. 説明資料	23

## Contents

1. Abstract	1
2. Purpose of the Research	2
3. Current Status of the Research	4
3.1 Development of the 4D Space Access Neutron Spectrometer (4SEASONS)	4
3.2 Building of the sample synthesis environment and sample preparation	6
3.3 Experimental research of oxide high- $T_c$ superconductivity	7
3.4 Workshops	7
4. Progress of the Research	9
4.1 Development of the 4D Space Access Neutron Spectrometer (4SEASONS)	9
4.2 Experimental research of oxide high- $T_c$ superconductivity	9
4.3 Building of the sample synthesis environment and sample preparation	9
4.4 List of publications	12
5. Research Organization	21
6. Explanatory Materials	23

## 1. 要旨

本研究は(1) J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex, 大強度陽子加速器)の大強度パルス中性子源において、現在世界最高性能である ISIS 施設の MAPS 分光器よりも 2 桁高い性能を有する実験装置、4 次元空間中性子探査装置(4SEASONS: 4d SpacE AccesS neutrON Spectrometer, 四季)を建設し、(2) 異常な磁気励起、フォノン異常現象を 3 次元の波数-エネルギーからなる 4 次元空間で詳細に観測することにより酸化物高温超伝導機構の解明を目指すものである。こうした研究では、これまで中性子実験で困難であった系統的な研究を展開することが重要である。そのために装置建設のみならず、(3) 高品質かつ十分な量の単結晶試料の作成を行う必要がある。H17 年度は、(1),(2),(3)のそれぞれについて以下のようないくつかの研究の進展があった。

(1) の四季の建設については、H17 年度で設計の基本仕様が決定し、解析的・数値的検討により、目標とする性能が十分達成可能であることを確認した。分光器全体設計に加え、スーパーミラー試作、検出器試作、スピニ偏極デバイス開発ステージの整備などを実施し、分光器の建設に向けた基盤が整った。H18 年度は真空散乱槽、中性子ガイド管、ビームライン遮蔽体の建設、検出器の性能試験および仕様の決定、および各デバイスの開発などを行う予定である。

(2) に関しては、原子炉およびパルス中性子源の中性子を利用した中性子散乱実験および、X 線非弾性散乱によって、酸化物高温超伝導体の実験的研究が進んだ。214 系超伝導体については、電子ドープ型超伝導体  $\text{Pr}_{1-x}\text{LaCe}_x\text{CuO}_4$  ではエネルギー領域によって性格の異なる磁気励起が存在することを示唆する結果が得られ、ホールドープ型超伝導体  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ においてフォノンのソフトニングの超伝導相での増強が観測された。さらに  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  (YBCO) においては、磁気励起における新しい共鳴ピークの存在、フォノンの強いソフトニングとフォノン状態密度と超伝導転移温度の相関などを見いだした。今後も引き続き、国内外の研究施設を利用して研究を進めて行く。

(3) の単結晶試料の作成については、H17 年度中に 214 系超伝導体および YBCO 系超伝導体の単結晶を育成する装置および単結晶方位測定装置の整備が完了し、214 系超伝導体や電子ドープ系超伝導体の単結晶作成が進んだ。H18 年度はそれらに加えて、さらに YBCO 系超伝導体の育成を進めて行く。

## 2. 研究目的

本研究は、2008 年稼動予定の J-PARC 中性子源を利用し、現在世界最高性能の装置に比べ 100 倍の性能を有する革新的な中性子非弾性散乱実験装置(四季)を建設し、酸化物高温超伝導物質の特異な磁気励起および異常なフォノンの詳細な観測を十分に準備された試料を用いて行い、他国の追随を許さない系統立てた研究を推進することにより、同機構解明に大きく貢献しようとするものである。

酸化物高温超伝導は 1986 年の発見以来、科学史上に前例のない集中的研究がなされたにもかかわらず、21 世紀にその機構解明を先送りされた物性物理学上極めて困難かつ重要な研究課題である。超伝導二次元面の銅原子が有するスピン 1/2 の存在が、今まで知られてきた BCS 超伝導機構と全く異なる可能性を予見させ、異常な物性を示すとともに、多くの理論の展開を誘発した。その結果、電荷-スピンの分離を伴う量子効果が超伝導機構の一つと考えられてきた。実際最近の研究により、物質の種類には関係なく、砂時計型といわれている奇妙な磁気励起が観測され、超伝導の起源と深くかかわっているものと考えられている。しかし一方で、BCS 理論で予言された電荷とフォノン(格子)の相互作用が超伝導を生み出す可能性についても最近大きな発見が相次いでいる。

酸化物高温超伝導がこれまでの超伝導と異なる点は超伝導の対称性が *d* 波的であることであり、その根元を知ることこそが機構解明の鍵を握っていると言ってよい。ところが、この対称性は電荷-スピン相互作用によっても、異方的な電子-格子相互作用によつても生じ得る。従って、電子間相互作用を媒介する磁気相互作用(磁気励起)、フォノンダイナミクス(格子運動)の全貌を知り、いかなる波数-エネルギー位置での励起(相互作用)が超伝導を生み出しているか知ることこそが、超伝導機構解明に最も重要な課題である。

しかし、図 2.1 にも示したように、両励起ともに量子効果によりエネルギー-波数空間に広範に広がる励起現象であるためシグナルが微弱であり、その詳細な観測は非常に困難である。パルス中性子はこのような大域にまたがる微弱な励起現象を一挙に観測しうる最も重要な研究手段の一つであるが、これまでのいかなる中性子源強度でもその詳細の観測には限界があった。

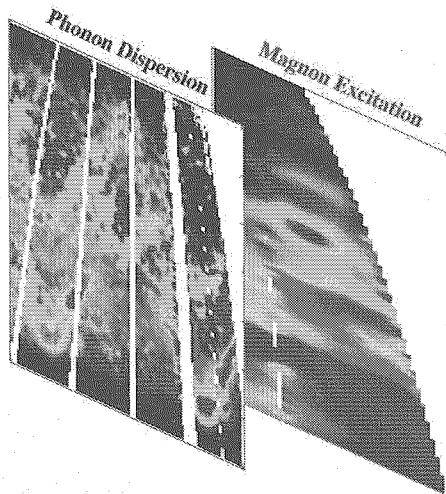


図 2.1.  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  で観測されたフォノンおよびマグノンの励起スペクトルの例。

2008 年に完成を目指す J-PARC 物質生命科学実験施設の中性子源(JSNS(1MW))は現在パルス中性子源として最強の英国ラザフォードアップルトン研究所(RAL)・ISIS 施設の 6 倍の中性子強度を実現する。しかしながらこの 6 倍の強度増大だけでは同研究の飛躍的進展は望めないと考える。従つて以下

の、わが国独自の優れた技術を活用し、

- 1) 現在世界最高性能の ISIS 施設の MAPS 分光器よりも中性子強度が 2桁強い実験装置を実現し、
  - 2) 異常な磁気励起、フォノン異常現象を3次元の波数-エネルギーからなる4次元空間で詳細に観測することにより酸化物高温超伝導機構の解明を飛躍的に推し進める
- ことを提案する。さらに、
- 3) 高品質かつ十分な量の単結晶試料の準備をおこない、装置利用が開始されるやいなや組織だった研究チームにより的を絞った観測点での集中的な実験を推進する。

一方、米国オークリッジ国立研究所に SNS 計画(1.4MW)が 2006 年に、さらに RAL の加速器増強と第 2 ターゲットステーション計画(ISIS-TS2, 0.3MW)がやはり 2006 年度を目指して建設がなされている。これら海外の研究施設でも同様に、建設完了を目指して高温超伝導機構の解明の研究が進められようとしている。当然 J-PARC が目指す最重要課題の一つとしても酸化物高温超伝導機構の解明が謳われている。本研究提案はそれを具現化するものである。従って、ここに提案する研究課題は、日米英それぞれの国家プロジェクトの威信をかけた物性物理学分野のもつとも激しい国際競争に位置づけられていると言つてよい。

わが国はこれまで、世界最高性能のパルス中性子実験装置建設の経験を十分有しており、目標とする装置性能を実現することは十分に可能であると考えている。また、わが国は酸化高温物超伝導の研究分野において、質、量ともに世界をリードする研究を開拓してきた。従って、研究者の経験、資質、世界最高水準の試料の製造技術を持っている。

このように、国際的な最先端の競争に打ち勝つために、先進各国が計画している装置よりも格段に高い性能を有する実験装置を建設すること自体、他国が追随できない独創性を有するが、それに加えて、中性子実験装置技術および酸化物高温超伝導研究分野で世界の最先端にいる研究者を組織化して強固に推し進める体制を組むことは他国が決してまねのできない本研究の秀でた特徴である。

### 3. 研究の進展状況

#### 3.1. 4次元空間中性子探査装置(四季)の建設

本研究目的である酸化物高温超伝導体の研究に用いる4次元空間中性子探査装置(四季)の基本仕様が固まった。四季は英国 ISIS 施設 MAPS 分光器の 100 倍の性能の実現を目的としているが、解析的・数値的検討により目標とする性能が十分実現可能であることが定量的に確認できた。こうした検討結果を元に実験装置設置詳細計画書を作成し、J-PARC 中性子実験装置計画検討委員会による審査に合格し、J-PARC 物質・生命科学実験施設 (MLF) の No. 1 ビームライン (BL1) に設置されることが決まった。さらに、四季の狙い、基本仕様、検討結果を国内外の研究会にて発表すると同時に、高温超伝導研究、装置開発研究の専門家から広く意見を招請することができた。

その他の進展状況は以下の通りである：

##### (1) 分光器本体

決定した基本仕様を元に分光器の全体設計を国内の企業と共同で行い、完了した。この全体設計により、真空散乱槽の排気に必要なポンプの性能が明らかになり、真空散乱槽排気用のスクロールポンプおよびターボポンプを各 1 台購入した。

H18 年度は真空散乱槽の製作を行う予定である。そのための実施設計が現在国内の企業と共同で進行中である。

##### (2) 遮蔽体

中性子線、 $\gamma$  線による放射線被曝を防ぐため、分光器は遮蔽体で覆い、遮蔽体表面からの放射線量を J-PARC/MLF 安全グループによって定められた基準値以下に抑える必要がある。そこで本年度は中性子・ $\gamma$  線輸送計算コード PHITS による遮蔽計算を国内の企業と共同で行い、安全基準を満たすような遮蔽体の構造を定めた。

その後 J-PARC/MLF の放射線量基準が改定されたため、H18 年度は新基準に基づいて遮蔽体設計を再検討する予定である。さらにビームライン部の遮蔽体を製作する予定である。

##### (3) 中性子ビーム輸送系

中性子ビームを線源から試料付近まで輸送するガイド管のデザインについて検討を行った。その結果、 $m=4$  スーパーミラーを使用することで、ガイド管を持たない場合に比べて、150 meV の中性子に対して 5 倍以上の強度ゲインが得られることが分かった。この値は、ガイド管を持たない MAPS 分光器と比べると 3 倍近い強度ゲインが得られることに相当する。それに加えて試料位置の上流により高性能の集光デバイスを設置することで、さらなる強度の増加が見込まれる。これらの検討結果に基づき、シャッター部のガイド管は詳細仕様を決定し、その調達を行った。

また、以上のような中性子ビームの輸送・集光効率の飛躍的増強を現実のものとするため、大面積イオンビームスパッタ装置を用いた高性能スーパーミラーの研究開発を実施した。これまでのスーパーミラー開発の課題であった、Ni/Ti 多層膜の界面粗さ、界面拡散を低減するため、イオンビームスパッタ法を用いて、成膜粒子のエネルギーを増加させ、基板をプラズマから分離することで、急峻な界面をもち、膜付着力が強く、高精度で制御された多層膜を作成することに成功した。これをもとに世界最高の臨界角を有する  $m=6.7$  スーパーミラー(膜総数 8000 層)の開発に成功した。

さらに、中性子集光デバイスの開発を目的として、基板加工のための数値制御ローカルウェットエッチング装置を整備し、その加工特性試験を行った。その結果、形状加工にともなう表面粗さの増加がないことを確認し、スーパーミラー成膜が可能な任意形状の光学基板を作成できる見通しを得た。

#### (4) 中性子位置敏感型検出器

##### (4-1) 検出器仕様の検討

当該分光器で目的とする非弾性散乱強度に対する中性子検出は高い計測率を必要としないため既存の検出器では<sup>3</sup>Heガス検出器が最も適している。しかしながら、高温超伝導体の素励起についてより効果的な研究を推進するためには、

- i) 微弱な散乱を効率よく(良いS/N比で)検出できること
- ii) 大立体角配置による検出器間のギャップを最小限にすること

を実現する必要があり、平成17年度および18年度で以下の検討と実際の中性子ビームを使用した試験を行った。i)については、真空槽本体からのバックグラウンドを除去するため、検出器本体を散乱真空槽の内部に設置することにした。これまでに検出器アンプの設置および高圧配線や交換時の取り回しの検討を行った。真空槽内への配置とその問題点、特に真空シールの問題や熱除去の問題、真空結合(カップリング)形状などは今後も引き続き検討を行う。ii)の課題については、汎用的に使用されている64cmならびに1mの位置敏感検出器よりも長い(長尺)ものを使用することにより検出ギャップを最小化することとした。上記の検討を踏まえ、H18年度中に検出器仕様を決定する予定である。

##### (4-2) 中性子オンビームでの試験

試験器を用いた性能評価と既存のアンプ系および測定読み出し回路系との動作確認を行うため、試験用検出器の購入および、長尺検出器保持架台の作成、アンプボックスの作成と回路システムの作成を行った。検出器は東芝電子管デバイス社製とGE/Reuter-Stokes社製の2.5m長PSDである。H18年度より日本原子力研究開発機構(原子力機構)3号炉ガイドホールにおいて、中性子ビームによる試験を開始し、すでに以下の結果を得た：

- $\gamma$ 線/中性子の分離は比較的良好
- 位置直線性(近似直線との誤差)： $\pm 1.4\text{mm} \pm 2.3\text{mm}$ (管直径2/3")、 $\pm 1\text{mm}$ 以内(管直径3/4")
- 位置分解能：15.3mm(管直径3/4")、12.3-14.1mm(管直径2/3")

以上の性能は当該分光器で目標としている  $\Delta Q/k_i = 1\%$ 程度、 $\Delta E/E_i = 6\%$  ( $E=0$ )程度の分解能を実現するためには十分である。

#### (5) MAGIC チョッパー開発

四季では、異なる入射エネルギーを持つ複数の中性子ビームを同時に利用して非弾性中性子散乱測定を行うこと(Repetition Rate Multiplication, RRM法)によって、測定効率を向上させることを計画している。しかしながら、この手法は通常のフェルミチョッパーを用いた分光器では、全ての入射エネルギーに対して、それぞれの実験条件を最適化することが不可能であった。昨年度より我々は、両面に中性子スーパーミラーを貼付した中性子吸収材と中性子透過材とを交互に積層したスリットパッケージをフェルミチョッパーに装填することによって、非弾性中性子散乱測定の効率を飛躍的に向上させる方法を提案しており、これまで詳細な検討を重ねてきた。このスリットパッケージを装填したフェルミチョッパー(MAGIC チョッパー)では、開口時間幅を広いエネルギー範囲に亘って最適化することができ、利用する複数の入射エネルギー全てに対して優れた実験条件が実現される。従って、このチョッパーを用いることによる測定効率の向上は、同時に利用可能な入射エネルギーは5~6倍になり、各エネルギーでの強度の増加は通常のチョッパーを用いてRRM測定を行った場合に比べて1~6倍になることが見込まれている。この新しいチョッパーの計算上の性能評価はほぼ終了しており、現在は我々のアイディアを実証するための試作

機の製作を行っている。今後はこの試作機を使ったテスト実験を行い、実機に向けた詳細設計に反映させる予定である。

#### (6) 偏極子開発

偏極中性子散乱実験により磁気励起とフォノンの分離を行うため、中性子偏極法の開発を行ってきた。 $^3\text{He}$  の原子核はスピンに依存した大きな中性子吸収断面積を持つことから、これを偏極することにより中性子ビームの偏極化が実現可能である。この性質を利用した偏極デバイスは  $^3\text{He}$  スピンフィルターと呼ばれ、すでに KEK において開発研究が進められてきた。原子力機構内でも  $^3\text{He}$  スpinフィルター開発室 (SEOPステーション) の整備を進め、H17年度までに大型ヘルムホルツコイルや各種計測機器を導入し、偏極率測定のための整備はほぼ終了した段階である。H18年度より光ポンピング用光学機器の整備、大型セル用オーブンの設計・製作を進めており、H18年度中に原子力機構内で  $^3\text{He}$  スpinフィルターを供給できる体制を整えることを目指して開発を進めている。

#### (7) データ解析ソフトウェア

四季から生成される大量の測定データを効率良く処理し、実験者が理解し易い形へ変換するには、高度な解析ソフトウェアが必要である。1測定あたり1Gバイト以上に達するデータ量、および、RRM法による測定は、既存のデータ解析ソフトウェアだけでは扱いが困難であり、より高度なソフトウェアを開発する必要がある。そのため、H17年3月よりこの任に専従するための博士研究員(稻村泰弘氏)を迎えて、ソフトウェア開発体制の充実を図った。本データ解析ソフトウェアは、J-PARC/MLFの基盤データ解析ソフトウェアである Manyo ライブラリの開発グループと連携して開発を進めて行くが、本分光器特有の箇所については、H18年度より国内の企業と共同で開発を進めて行く予定である。

### 3.2. 試料作成環境の構築と試料作成

#### (1) YBCO系銅酸化物高温超伝導体の単結晶育成

四季を用いた実験へ向けて、銅酸化物高温超伝導体の単結晶育成ができる環境整備を行っている。平成17年度に原子力機構Co60照射準備室(04-06号室)の改裝を行い、超電導工学研究所盛岡研究所からYBCO単結晶に単結晶育成用チョクラルスキー(CZ)法引き上げ炉を譲り受けた。これに関連して、大阪大学大学院理学研究科田島研究室で、YBCO単結晶育成の具体的な方法を見学した。また4橋円鏡型浮遊帯域溶融(FZ)装置を原子力機構内で移設した。

平成18年度では、まず4月3日から博士研究員(今井良宗氏)を迎えた。さらに高エネルギー加速器研究機構から2橋円鏡型FZ装置を移設することで、これまでに図3.1に見られるような単結晶育成装置3台をCo60照射準備室(04-06号室)に設置した。これにより十分な結晶育成環境が整ったと言える。これからロードセルを取り付けるなどCZ炉の修理を行う。またこの移設に伴い、電気容量が足りなくなったことから、電気工事と配電盤の取替えを行う。今後、銅酸化物高温超伝導体の研究では、より大型でありより良質な単結晶が望まれることから、結晶育成環境にも配慮し、結晶育成における温度変化の外部要因をなくすこと、また空気を乾燥させる目的で、エアコンの整備を行う。これらの環境整備と同時に現在、結晶育成としては、CZ炉を用いたYBCO単結晶の育成用に融点の高い $\text{NdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ を $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 結晶の種結晶にする目的で、フラックス法を用いた $\text{NdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ 単結晶の育成を開始した。

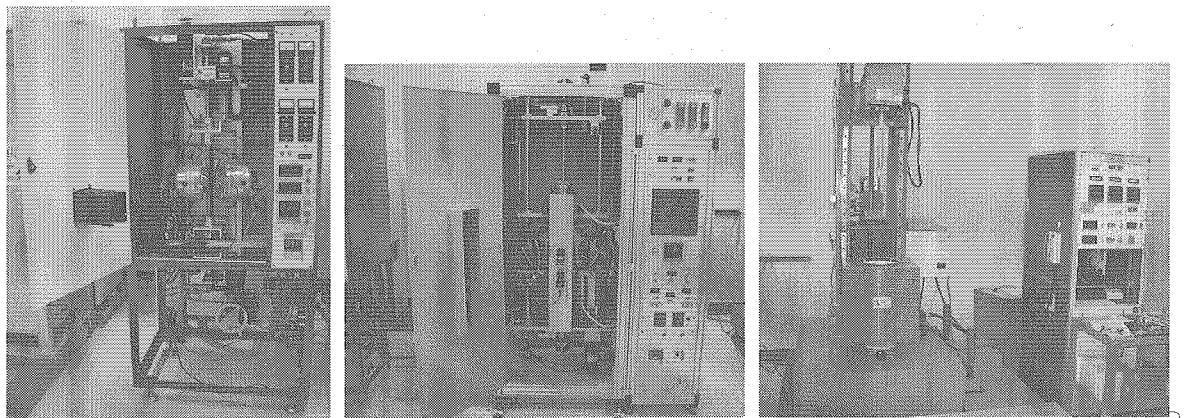


図 3.1. Co60 照射準備室(04-06 号室)に集められた 3 台の結晶育成装置。

## (2) La 系および電子ドープ系銅酸化物高温超伝導体の単結晶育成

既存のランプイメージ炉を活用し、年間で平均 25 種類、100cc 以上の単結晶を量産し、中性子散乱研究などに活用している。これら単結晶は、四季の完成を待って、高エネルギー領域でのより詳細な実験に利用される。なお H18 年度の後半には、レーザービーム加熱方式の電気炉を導入し、従来の方法では大型化が困難な単結晶育成を行なう。

### 3.3. 酸化物高温超伝導の実験研究

中性子散乱による実験研究を、低エネルギー領域は主に原子炉からの定常ビームを利用し、高エネルギー領域はパルス中性子源を利用して行った。ただし、パルス中性子源として現在最も多く活用している ISIS の中性子分光器 MAPS は十分なビームタイムの獲得が大変困難な状況にあり、アメリカ・ロスアラモス研究所のパルス中性子源に設置された分光器 Pharos の利用もスタートさせた。さらにフォノンなど中間エネルギー領域での研究にはフランスのサックレー研究所などと共同研究を行い、SPring-8 の X 線非弾性散乱装置も利用した。その結果、4.2 項に示すような電子ドープ型超伝導体  $\text{Pr}_{1-x}\text{LaCe}_x\text{CuO}_4$  の磁気励起における異常やホールドープ型超伝導体  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  におけるフォノンのソフトニングの超伝導相での増強、 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  の磁気励起における異常やフォノンのソフトニングと超伝導転移温度の相関などを見いだした。

また原子力機構の 3 号炉に 3 軸型中性子分光器 AKANE を設置し、その高輝度化につとめた。その結果、銅酸化物超伝導体の研究に利用出来るビームタイムを大幅に増やすことができ、作成した試料の系統的研究や評価ができる体制が整った。

### 3.4. 研究会・ワークショップ

#### (1) 科研費特別推進研究 研究会「量子ビームによる高温超伝導機構の解明」

開催場所：茨城県北茨城市五浦観光ホテル別館大観荘

開催日：2005 年 11 月 1 日～2 日

高温超伝導機構の研究について最新の動向を探り、本特別推進研究にて遂行される研究の方向付けを得ると同時に、関連分野の研究者との連携を図ることを目的で開催された。参加者は 30 名で 12 の口頭による講演があった。第 1 回となる今回は研究組織のキックオフを兼ね、特別推進研究の目的や研究計画の概要、四季とそれが建設される J-PARC の状況の報告がなされた。また、これまで高温超伝導が如何

に理解されてきたか、何が理解できていないかを理論の講演から確認、議論し、同時に四季の設計に反映させるべく測定すべき諸物理量(運動量・エネルギー・分解能等)の scientific な要求が探られた。同時に、特別推進研究での主要な測定手段となる中性子散乱と相補的に利用されるARPES や放射光でのX線非弹性散乱実験での最新の研究成果についても報告がなされ、議論が行われた。研究会の模様は中性子科学会誌「波紋」Vol.16, No.1 にて報告された。会議録は、原子力機構より JAEA-Review 2006-006 として発行された。

## (2) 中性子非弾性散乱装置国際ワークショップ「2nd Workshop on Inelastic Neutron Spectrometers 2005 (WINS2005)」

開催場所: Rydges Esplanade Resort Cairns, Cairns, Australia

開催日: 2005 年 12 月 5 日～6 日

ICNS2005(国際中性子学会)のサテライト会議として、原子力機構、高エネルギー加速器研究機構、オーストラリア原子力科学研究所(ANSTO)の共催で開催した。これは、中性子非弾性散乱装置とその周辺のハードウェア、ソフトウェアに関して、その技術的な側面に特化した国際ワークショップであり、科研費特別推進研究で建設される四季の設計とその関連技術の開発に反映させる最新の技術の収集と情報交換、議論の場を得ることを狙い開催したものである。日本をはじめ、オーストラリア、米国、フランス、ドイツ、イギリス、韓国から 36 名が参加。口頭発表は 22 件、ポスター発表は 9 件であった。J-PARC の他、米国 SNS、英国 ISIS、韓国 HANARO 等に建設が計画されている新しい中性子分光器についての報告、最新の測定技術、関連する周辺機器、ソフトウェアについて報告と討論がなされ、将来の国際協力についても議論された。ワークショップの報告は、中性子科学会誌「波紋」Vol.16, No.1 に掲載され、Newtron News(Taylor & Francis)にも掲載予定である。会議の成果は Journal of Newtron Research の別冊として発行される。

## 4. これまでの研究成果

### 4.1. 4次元空間中性子探査装置(四季)の建設

#### (1) 装置全般

本研究遂行の中心となる四季について、解析的・数値的手法によりその予想性能を検討、目標とする性能が達成可能であることを確認し、設計の基本仕様を決定した。その結果を「量子ビームによる高温超伝導機構の解明」研究会および WINS2005 の国内外の研究会(3.4 項参照)において発表した。

さらに、分光器遮蔽体表面からの放射線量を J-PARC/MLF 安全グループによって定められた基準値以下に抑えるため、中性子・ $\gamma$  線輸送計算コード PHITS による遮蔽計算を国内の企業と共同で行い、安全基準を満たすような遮蔽体の構造を定めた。

#### (2) 各デバイス開発

3.1 項に示したように、スーパーミラー、検出器、チョッパー、スピニ偏極デバイス等の四季分光器建設に必要な各デバイスについても検討・開発が進んだ。

特に、スーパーミラーの開発では、イオンビームスパッタ法により世界最高の臨界角を有するスーパーミラーの開発に成功した。その成果は国内外の研究会にて発表した。

検出器開発においては H18 年度早々に試験器の中性子検出試験が始まっており、十分な位置線形性と位置分解能が得られている。その結果は J-PARC の広報誌である J-PARC News にて発表した。

チョッパーについては、スリットの中性子吸収材の両面にスーパーミラーを貼付した新しいスリットパッケージを開発することで、これまで四季のようなエネルギー領域を狙った中性子分光器では困難であった RRM 法による複数入射エネルギー同時測定が可能になることを見出した。そのアイディアは現在特許出願中である。

### 4.2. 試料作成環境の構築と試料作成

今後の研究に備えて多数の超伝導系の単結晶の作成を進めている。原子力機構内にて YBCO 系超伝導酸化物単結晶育成用の CZ 炉を整備し、さらに FZ 装置も整備し、あわせて 3 台の単結晶育成装置の整備が完了した。今年度より YBCO 系高温超伝導酸化物の単結晶の育成を開始したところである。東北大学においては特に La, Cu サイト置換のホールドープ系  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  や電子ドープ系  $\text{Pr}_{1-x}\text{LaCe}_x\text{CuO}_4$  などの単結晶作成が進んだ。すでにこれらの試料の一部は 4.3 項の研究成果に寄与している。

### 4.3. 酸化物高温超伝導の実験研究

#### (1) $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$ , $\text{Pr}_{1-x}\text{LaCe}_x\text{CuO}_4$ (214 系超伝導体) の研究

銅酸化物超伝導体の基礎研究は現在第 2 期と言える。銅酸化物超伝導体の普遍的性質を明らかにしていく状況下にある。その 1 つに、中性子散乱に関して現在世界的に熾烈な研究競争が行われているのは、銅酸化物超伝導体の磁気励起スペクトル構造の普遍性とその起源に関するものがある。ホールドープ型超伝導体では、磁気励起はいわゆる砂時計型の  $(Q, \omega)$  構造を持つことが数年来の中性子散乱研究で明らかになってきた(本研究グループが世界に先駆けて発見:M. Arai *et al.*, Phys. Rev. Lett. **83** (1999) 608)。我々は、このような磁気励起の構造が、ホールの過剰ドープ領域でどうなっているかを ISIS の

MAPS を用いて調べた。その結果、磁気信号が、最適ドープ領域と比較して異常に弱くなってしまっており、砂時計型の( $Q, \omega$ )構造自身がほとんど観測出来なくなっていることを明らかにした。この領域のさらに詳細な研究には、「四季」のような高強度の分光器が必要となる。ホール系と比較して、電子ドープ型超伝導体の磁気励起の( $Q, \omega$ )構造は、ほとんどわかつていなかった。我々は電子ドープ型超伝導体  $\text{Pr}_{1-x}\text{LaCe}_x\text{CuO}_4$  の磁気励起を、MAPS を用いて測定したが、ほぼ同じ組成の試料を、アメリカオークリッジ研究所のグループも測定し、熾烈な研究競争を行なっている。得られた結果は、両者で概略同じであるが、我々は 60meV 付近の磁気励起信号が異常に弱いことを見いだし、ホール型で見られる砂時計型とは異なるが、低エネルギーと高エネルギー領域で性格の異なる磁気励起が存在している可能性を提言した(図 4.1 左)。さらに詳細な研究を行うには、希土類イオンの結晶場励起の影響の少ない電子ドープ型の単結晶探索が必要となる。

もう 1 つの研究の流れは、電荷の動的不均一性が銅酸化物の普遍的な性質か否かに関してである。我々は、この問題をフォノンのソフトニングを通して研究した。La 系超伝導体に対して X 線非弾性散乱と中性子非弾性散乱の両方を行ない、ボンド伸縮モードのソフトニングの詳細なドーピング依存性を測定した。その結果、超伝導相近傍でこのソフトニングが増強されることを見いたした(図 4.1 右)。これと類似の結果は、転移温度の高い YBCO 系などでも見られ、銅酸化物超伝導体では、一般的に電荷揺らぎと強く結合するフォノンがあり、そのソフトニングが超伝導相で強く増強されていることを示唆している。この実験とは全く独立に、理論によって低エネルギーの異方的な電荷の揺らぎの存在が  $t$ - $J$  モデルによって示され、実験から得られたソフトニングの異方性やドープ量依存性が、理論で半定量的に再現されることがわかつた。このように銅酸化物超伝導体では、スピント電荷が表裏一体として運動しており、超伝導の引力の起源として何らかの形で関わっていることが、この実験から明らかになった。

磁気励起とフォノンの両方が観測出来る中性子散乱で( $Q, \omega$ )空間の広い領域での情報収集がこれから重要となる。

これらの成果は、フォノンに関してはすでに発表済み(K. Ikeuchi *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **45** (2006) 1594-1601 and T. Fukuda *et al.*, Phys. Rev. B **71** (2005) 060501(5)), 電子ドープ型の磁気励起に関しては、論文が掲載可(M. Fujita *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. (2006))であり、過剰ドープの磁気励起に関しては、今夏の国際会議 M2S(ドレスデン)で招待講演を行なった。

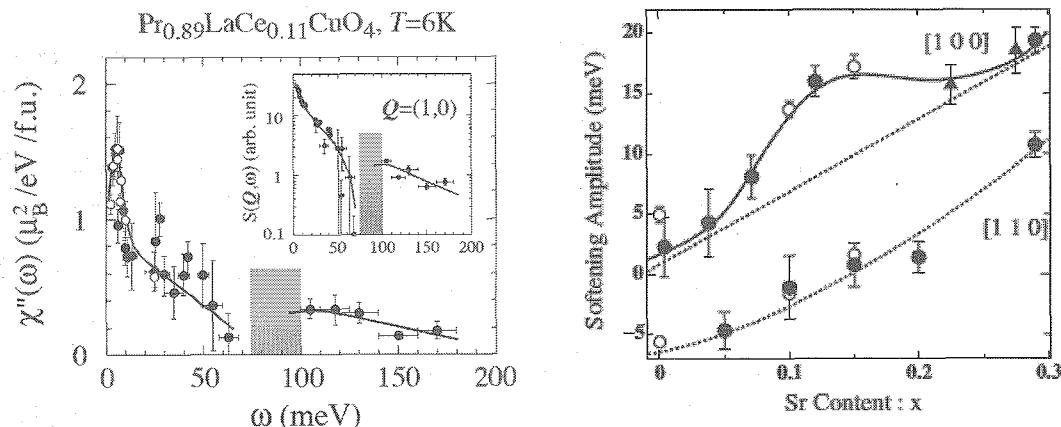


図 4.1. (左)  $\text{Pr}_{0.89}\text{LaCe}_{0.11}\text{CuO}_4$  における磁気励起スペクトル。(右)  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  におけるフォノンのソフトニングの  $x$  依存性。

## (2) $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ (YBCO)の研究

(1)で述べた 214 系の高温超伝導体にたいして、高温超伝導を代表するもう一つの系  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  (YBCO)についてもその磁気励起とフォノン異常の研究を行なった。まず観測された砂時計型の(不整合)

構造は、超伝導状態を最も反映していると考えられる最適ドープ組成ではその強度が減少し、ほとんど観測されない。一方、非常に強調された共鳴ピーク(214系では観測されていない)が観測された(図4.2)。さらに、共鳴ピークよりも高エネルギー側の動的構造を新たに観測することに成功し、以下に示す事柄を明らかにした。

- 磁気的な動的構造の全体像(比較的高エネルギー側まで)を観測し、 $\text{CuO}_2$ 面のFermi面のネスティングから計算される  $S(Q,\omega)$  は我々の結果を良く再現する。(図4.3)
- (共鳴ピークより)高エネルギー側には低温でより発達する局所構造が  $Q=(\pi,\pi)$  で観測された。(図4.2「2nd Resonance」)
- その新しい共鳴ピーク(54meV)とこれまでに観測されていた共鳴ピーク(43meV)の積分強度はそれぞれ二枚の  $\text{CuO}_2$  面によるモデュレーションを考慮することによってマグノンの音響モードと光学モードで説明できる。

これらの事実は全く新しい発見であり、超伝導発現に対する磁気励起の役割について新しい知見を与えるものである。

現在高温超伝導体における電子-格子相互作用の重要性が再認識されているが、我々は YBCO における 3 種類のホール濃度についてフォノンの伸縮モードの分散を測定した。 $Q=(\pi,\pi)$ においてホール濃度に依らず、強いソフト化が発現することを見いたした。特筆すべき点はソフト化したフォノン状態密度によって超伝導転移点がスケールされることであり、超伝導発現に対して電子-格子相互作用を捉え直す必要性を示唆している(図4.4)。

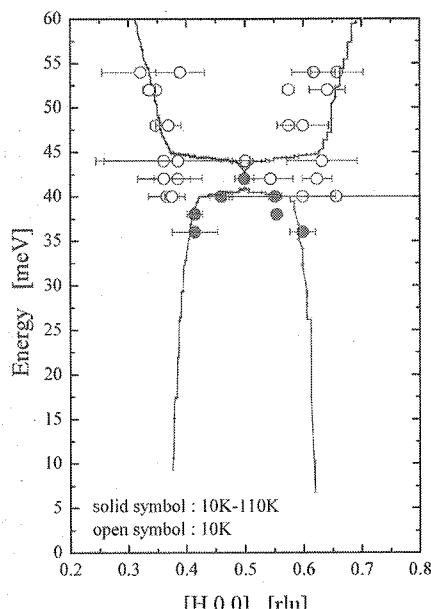


図4.3.  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.9}$  における磁気励起の分散。

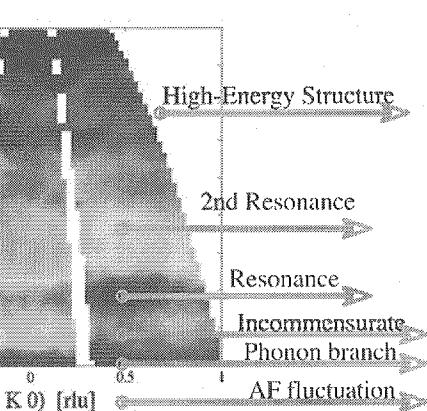


図4.2.  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-s}$  における高エネルギー磁気励起スペクトル。

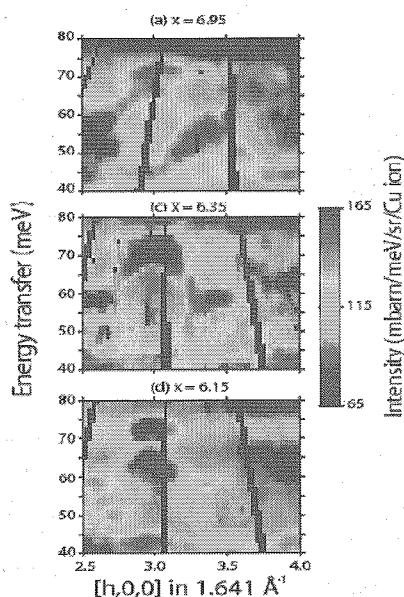


図4.4.  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$  ( $x=6.95, 6.35, 6.15$ ) におけるフォノンの伸縮モードの分散。

#### 4.4. 研究発表リスト

##### 論文発表

- [1] **Relation between High Ionic Conductivity and Boson Peak in Superionic Glass**  
M. Arai, H. Iwase, M. Nakamura, T. Otomo, E. Kartini, K. Itoh, S.J. Levett, S.M. Bennington  
AIP Conference Proceedings **832** (2006) 299-302
- [2] **Unique Vibrational Excitations in Superionic Conducting Glass**  
M. Nakamura, M. Arai, E. Kartini, J.W. Taylor, M. Russina  
AIP Conference Proceedings **832** (2006) 504-507
- [3] **Initial growth stage of a highly mismatched strontium film on a hydrogen-terminated silicon (111) surface**  
H. Asaoka, T. Yamazakia, S. Shamoto  
Appl. Phys. Lett. **88** (2006) 201911
- [4] **Low symmetry phase in (001) BiFeO<sub>3</sub> epitaxial constrained thin films**  
Guangyong Xu, H. Hiraka, G. Shirane  
Appl. Phys. Lett. **86** (2005) 182905(3)
- [5] **Neutron Powder Diffraction Study on the Crystal and Magnetic Structures of BiCoO<sub>3</sub>**  
A.A. Belik, S. Iikubo, K. Kodama, N. Igawa, S. Shamoto, S. Niitaka, M. Azuma,  
Y. Shimakawa, M. Takano, F. Izumi, E. Takayama-Muromachi  
Chem. Mater. **18** (2006) 798-803
- [6] **High Resolution Chopper Spectrometer at J-PARC**  
S. Itoh, K. Ohoyama, T. Kamiyama, T. Otomo, K. Nakajima, R. Kajimoto, T. Yokoo,  
K. Kuwahara, K. Tomiyasu, O. Yamamuro, S. Muto, H. Sagehashi, J. Suzuki, K. Ueno, T. Ino  
ICANS-XVII 17th meeting of the International Collaboration on Advanced Neutron Sources  
(Santa Fe, New Mexico)
- [7] **BiScO<sub>3</sub>: Centrosymmetric BiMnO<sub>3</sub>-type Oxide**  
A.A. Belik, S. Iikubo, K. Kodama, N. Igawa, S. Shamoto, M. Maie, T. Nagai, Y. Matsui,  
S.Y. Stefanovich, B.I. Lazoryak, E. Takayama-Muromachi  
J. Am. Chem. Soc. **128** (2006) 706-707
- [8] **A new neutron reflectometer SUIREN at JRR-3**  
D. Yamazaki, A. Moriai, T. Ebisawa, R. Maruyama, I. Tamura, K. Soyama, M. Takeda,  
M. Hino  
submitted to J. Appl. Crystallogr.
- [9] **Two-dimensional sodium fluctuation at high temperatures in a high-temperature thermoelectric material  $\gamma\text{-Na}_{0.7}\text{CoO}_2$**   
S. Shamoto, Y. Hasegawa, T. Kajitani  
Jpn. J. Appl. Phys. in press
- [10] **Growth, Characterization and Application of Single-Crystal La<sub>2-x</sub>Sr<sub>x</sub>CuO<sub>4</sub> Having a Gradient in Sr Concentration**  
K. Ikeuchi, K. Isawa, K. Yamada, T. Fukuda, J. Mizuki, S. Tsutsui, A.Q.R. Baron  
Jpn. J. Appl. Phys. **45** (2006) 1594-1601
- [11] **Utilization of multiple incident energies on Cold-Neutron Disk-Chopper Spectrometer at J-PARC**  
M. Nakamura, K. Nakajima, R. Kajimoto, M. Arai  
J. Neutron Research, in press
- [12] **High intensity chopper spectrometer 4SEASONS at J-PARC**  
R. Kajimoto, T. Yokoo, K. Nakajima, M. Nakamura, K. Soyama, T. Ino, S. Shamoto, M. Fujita,  
K. Ohoyama, H. Hiraka, K. Yamada, M. Arai  
J. Neutron Research, in press
- [13] **Structure of New Superionic Glasses (CuI)<sub>x</sub>(AgPO<sub>3</sub>)<sub>1-x</sub>**  
E. Kartini, M. Arai, H. Iwase, T. Yokoo, K. Itoh, T. Kamiyama, S. Purnama  
J. Neutron Research **13** (2005) 145-148
- [14] **Spin Dynamics in High-T<sub>c</sub> Superconductor YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>6.9</sub>**  
T. Yokoo, M. Arai, C.D. Frost, Y. Endoh, T. Egami, Y. Shiohara, S. Tajima  
J. Neutron Research **12** (2004) 273-298
- [15] **Magnetic and Transport Properties of Gd<sub>3</sub>Ir<sub>4</sub>Sn<sub>13</sub> with Unique Crystal Structure**

- C. Nagoshi, R. Yamamoto, K. Kuwahara, H. Sagayama, D. Kawana, M. Kohgi, H. Sugawara,  
 Y. Aoki, H. Sato, T. Yokoo, M. Arai  
*J. Phys. Soc. Jpn.* **75** (2006) 044710-044716
- [16] **Hole-Induced Novel Spin State within Haldane Gap in  $Nd_{2-x}Ca_xBaNiO_5$**   
T. Sasaki, T. Yokoo, S. Katano, J. Akimitsu  
*J. Phys. Soc. Jpn.* **74** (2005) 267-270
- [17] **Soft Phonons and Structural Phase Transitions in  $La_{1.875}Ba_{0.125}CuO_4$**   
 H. Kimura, Y. Noda, H. Goka, M. Fujita, K. Yamada, G. Shirane  
*J. Phys. Soc. Jpn.* **74** (2005) 445-449
- [18] **Revised Crystal Structure Model of  $Li_2NH$  by Neutron Powder Diffraction**  
K. Ohoyama, Y. Nakamori, S. Orimo, K. Yamada  
*J. Phys. Soc. Jpn.* **74** (2005) 483-487
- [19] **Detailed Measurements of Characteristic Profiles of Magnetic Diffuse Scattering in  $ErB_2C_2$**   
K. Ohoyama, K. Indoh, A. Tobe, K. Kaneko, A. Hino, H. Onodera  
*J. Phys. Soc. Jpn.* **74** (2005) 731-734
- [20] **Orbital Ordering in Ferromagnetic  $Lu_2V_2O_7$**   
 H. Ichikawa, L. Kano, M. Saitoh, S. Miyahara, N. Furukawa, J. Akimitsu, T. Yokoo,  
 T. Matsumura, M. Takeda, K. Hirota  
*J. Phys. Soc. Jpn.* **74** (2005) 1020-1025
- [21] **Ni Impurity Effect on Antiferromagnetic Order in Hole-doped  $La_{2-x}Sr_xCuO_4$**   
H. Hiraka, T. Machi, N. Watanabe, Y. Itoh, M. Matsuda, K. Yamada  
*J. Phys. Soc. Jpn.* **74** (2005) 2197-2200
- [22] **X-ray and Electron Diffraction Study of a Precipitation Phase in  $Nd_{1.85}Ce_{0.15}CuO_4$  by Single Crystal**  
 H. Kimura, Y. Noda, F. Sato, K. Tsuda, K. Kurahashi, T. Uefuji, M. Fujita, K. Yamada  
*J. Phys. Soc. Jpn.* **74** (2005) 2282-2286
- [23] **R-dependence of spin exchange interactions in  $RMnO_3$  ( $R$  = rare-earth ions)**  
R. Kajimoto, H. Mochizuki, H. Yoshizawa, H. Shintani, T. Kimura, Y. Tokura  
*J. Phys. Soc. Jpn.* **74** (2005) 2430-2433
- [24] **Field-Induced Uniform Antiferromagnetic Order Associated with Superconductivity in  $Pr_{1-x}LaCe_xCuO_4$**   
 R. Kadono, K. Ohishi, A. Koda, S.R. Saha, W. Higemoto, M. Fujita, K. Yamada  
*J. Phys. Soc. Jpn.* **74** (2005) 2806-2812
- [25] **Electron-phonon coupling reflecting dynamic charge inhomogeneity in copper-oxide superconductors**  
 D. Reznik, L. Pintschovius, M. Ito, S. Iikubo, M. Sato, H. Goka, M. Fujita, K. Yamada,  
 G.D. Gu, J.M. Tranquada  
*Nature* **440** (2006) 1170-1173
- [26] **Instrument Suite for JSNS, J-PARC**  
M. Arai  
*Neutron News* **16-1** (2005) 25-28
- [27] **Cold neutron double-chopper spectrometer at J-PARC**  
K. Nakajima, M. Nakamura, R. Kajimoto, S. Itoh, T.J. Sato,  
 T. Osakabe, K. Kakurai, M. Matsuda, N. Metoki, S. Wakimoto, M. Arai  
*J. Neutron Research*, in press
- [28] **Development of neutron supermirror with large-scale ion beam sputtering instrument**  
 R. Maruyama, D. Yamazaki, T. Ebisawa, M. Hino, K. Soyama  
*Physica B*, in press
- [29] **Development of the engineering diffractometer at J-PARC**  
 A. Moriai, S. Torii, H. Suzuki, S. Harjo, Y. Morii, M. Arai, Y. Tomota, T. Suzuki, Y. Akiniwa, H. Kimura,  
 K. Akita  
*Physica B*, in press
- [30] **Inelastic scattering measurement option of TOF-USANS instrument at J-PARC**  
K. Aizawa, M. Arai  
*Physica B*, in press
- [31] **Low energy vibrational excitations characteristic of superionic glass**  
M. Nakamura, H. Iwase, M. Arai, E. Kartini, M. Russina, T. Yokoo, J.W. Taylor  
*Physica B*, in press

- [32] **Mobile cation motion in superionic glasses**  
 M. Russina, M. Arai, E. Kartini, F. Mezei, M. Nakamura  
 Physica B, in press
- [33] **On the origin of the structural transformation of the flux line lattice symmetry in YBCO**  
 M. Yethiraj, S.J. Crowe, D. McK.Paul, D.K. Christen, M. Arai  
 Physica B, in press
- [34] **Peak overlapping and its de-convolution in TOF diffraction data from neutron biological diffractometer in JPARC**  
 K. Kusaka, T. Ohhara, I. Tanaka, N. Niimura, T. Ozeki, K. Kurihara, K. Aizawa, Y. Morii,  
M. Arai, K. Ebara, Y. Takano  
 Physica B, in press
- [35] **Prototype of network distributed control system for MLF/J-PARC**  
 T. Nakatani, K. Nakajima, S. Torii, Bharoto, W. Higemoto, S. Sato, T. Otomo, M. Arai  
 Physica B, in press
- [36] **Repetition rate multiplication capability for a high energy resolution mode of DIANA at J-PARC**  
 N. Takahashi, K. Shibata, T.J. Sato, M. Arai  
 J. Neutron Research, in press
- [37] **Structural study on optical recording materials  $\text{Ge}_2\text{Sb}_{2+x}\text{Te}_5$  and  $\text{GeBi}_2\text{Te}_4$**   
 S. Shamoto, N. Yamada, T. Matsunaga, T. Proffen  
 Physica B, in press
- [38] **Structure and dynamics on superionic conducting phosphate glasses by neutron scattering**  
 E. Kartini, S.J. Kennedy, K. Itoh, M. Arai, F. Mezei, M. Nakamura  
 Physica B, in press
- [39] **Study of Converging Neutron Guides for the Cold Neutron Double-Chopper Spectrometer at J-PARC**  
R. Kajimoto, M. Nakamura, T. Osakabe, T. J. Sato, K. Nakajima, M. Arai  
 Physica B, in press
- [40] **IBARAKI Materials Design Diffractometer for J-PARC**  
 T. Ishigaki, S. Harjo, M. Yonemura, T. Kamaiyama, K. Aizawa, K. Oikawa, T. Sakuma, Y. Morii, M. Arai, K. Ebata, Y. Takano, T. Kasao.  
 Physica B, in press
- [41] **Neutron scattering study on stripe correlations in  $\text{La}_{2-x}\text{Ba}_x\text{CuO}_4$**   
M. Fujita, H. Goka , T. Adachi , Y. Koike , K. Yamada  
 Physica C 426-431 (2005) 257-261
- [42] **Impurity Effects on Spin Correlations in Electron-Doped  $\text{Pr}_{1-x}\text{LaCe}_x\text{Cu}_{1-y}\text{Zn}_y\text{O}_4$  by  $\mu\text{SR}$  Study**  
 A. Hino, M. Fujita, I. Watanabe, K. Yamada  
 Physica C 426-431 (2005) 309-314
- [43] **Magnetic Properties of the Overdoped Superconductor  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  with and without Zn Impurities**  
 S. Wakimoto, R.J. Birgeneau, A. Kagedan, H. Kim, I. Swainson, K. Yamada, H. Zhang  
 Phys. Rev. B 72 (2005) 064521(9)
- [44] **Dispersion of the High-Energy Phonon Modes in  $\text{Nd}_{1.85}\text{Ce}_{0.15}\text{CuO}_4$**   
 M. Braden, L. Pintschovius, T. Uefuji, K. Yamada  
 Phys. Rev. B 72 (2005) 184517 (10)
- [45] **Inelastic Neutron Scattering Study of Phonons and Magnetic Excitations in  $\text{LaCoO}_3$**   
 Y. Kobayashi, T.S. Naing, M. Suzuki, M. Akimitsu, K. Asai, K. Yamada, J. Akimitsu, P. Manuel, J.M. Tranquada, G. Shirane  
 Phys. Rev. B 72 (2005) 174405(1)-174405(7)
- [46] **Mapping Spin-Wave Dispersions in Stripe-Ordered  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{NiO}_4$  ( $x=0.275, 0.333$ )**  
 H. Woo, A.T. Boothroyd, K. Nakajima, T.G. Perring, C.D. Frost, P.G. Freeman, D. Prabhakaran, K. Yamada, J.M. Tranquada  
 Phys. Rev. B 72 (2005) 064437(1)-(13)
- [47] **Field-induced transition magnetically disordered and ordered phases in underdoped  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$**   
 B. Khaykovich, S. Wakimoto, R.J. Birgeneau, M.A. Kastner, Y.S. Lee, P. Smeibidl, P. Vorderwisch, K. Yamada  
 Phys. Rev. B 71 (2005) 220508(1)-(4)

- [48] Magnetic excitations from the linear Heisenberg antiferromagnetic spin trimer system  $A_3\text{Cu}_3(\text{PO}_4)_4$  ( $A = \text{Ca, Sr, and Pb}$ )  
 M. Matsuda, K. Kakurai, A. A. Belik, M. Azuma, M. Takano, M. Fujita  
*Phys. Rev. B* **71** (2005) 144411(1)-(5)
- [49] Doping dependence of softening in the bond-stretching phonon mode of  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  ( $0 \leq x \leq 0.29$ )  
 T. Fukuda, J. Mizuki, K. Ikeuchi, K. Yamada, A.Q.R. Baron, S. Tsutsui  
*Phys. Rev. B* **71** (2005) 060501(1)-(5)
- [50] Muon Spin Relaxation Studies of Magnetic-Field-Induced Effects in High- $T_c$  Superconductor  
 A.T. Savici, A. Fukaya, I.M. Gat-Malureanu, T. Ito, P.L. Russo, Y.J. Uemura, C.R. Wiebe,  
 P.P. Kyriakou, G.J. MacDougall, M.T. Rovers, G.M. Luke, K.M. Kojima, M. Goto, S. Uchida,  
 R. Kadono, K. Yamada, S. Tajima, T. Masui, H. Eisaki, N. Kaneko, M. Greven, G.D. Gu  
*Phys. Rev. Lett.* **95** (2005) 157001(1)-(4)
- [51] Direct Observation of a Nonmonotonic  $d_{x^2-y^2}$ -Wave Superconducting Gap in the Electron-Doped High- $T_c$  Superconductor  $\text{Pr}_{1-x}\text{LaCe}_x\text{CuO}_4$   
 H. Matsui, K. Terashima, T. Sato, T. Takahashi, M. Fujita, K. Yamada  
*Phys. Rev. Lett.* **95** (2005) 017003(1)-(4)
- [52] Momentum Dependence of Charge Excitations in the Electron-Doped Super-conductor  $\text{Nd}_{1.85}\text{Ce}_{0.15}\text{CuO}_4$ : A Resonant Inelastic X-Ray Scattering Study  
 K. Ishii, K. Tsutsui, Y. Endoh, T. Tohyama, S. Maekawa, M. Hoesch, K. Kuzushita, M. Tsubota,  
 T. Inami, J. Mizuki, Y. Murakami, K. Yamada  
*Phys. Rev. Lett.* **94** (2005) 207003(1)-(4)
- [53] Large Magnetic Field-Induced Spectral Weight Enhancement of High-Energy Spin Excitations in  $\text{La}_{1.88}\text{Sr}_{0.12}\text{CuO}_4$   
 L.H. Machtoub, B. Keimer, K. Yamada  
*Phys. Rev. Lett.* **94** (2005) 107009(1)-(4)
- [54] Orbital Nature of Ferromagnetic Magnons in Manganites  
 Y. Endoh, H. Hiraka, Y. Tomioka, Y. Tokura, N. Nagaoasa, T. Fujiwara  
*Phys. Rev. Lett.* **94** (2005) 017206(4)
- [55] Development of large  $m$  neutron supermirror with ion beam sputtering instrument  
 R. Maruyama, D. Yamazaki, T. Ebisawa, M. Hino, K. Soyama  
 submitted to Thin Solid Films
- [56] 世界の陽子加速器開発の動向 中性子発生源として脚光  
新井正敏  
*Science & Technology Journal* **14-9** (2005) 18-19
- [57] 中性子によるナノ構造と材料評価  
新井正敏  
*実験力学学会誌「実験力学」* **5** (2005) 3-6
- [58] J-PARCの先端的中性子実験装置群 基礎研究から産業応用まで貢献  
新井正敏  
*月刊エネルギー* **39-1** (2006) 52-57
- [59] J-PARCの先端的中性子実験装置群 基礎研究から産業応用まで貢献  
新井正敏  
*月刊エネルギー特集版* **39-1** (2006) 14-19
- [60] 海外における中性子利用の現状と将来  
新井正敏  
*放射線と産業* **107** (2005) 40-44

### 会議等での発表

- [1] The Whole Particle Structural Analysis on  $\text{TiO}_2$  and  $\text{Ge}_2\text{Sb}_2\text{Te}_5$  Nanoparticles  
 S. Shamoto, K. Kodama, S. Iikubo, T. Taguchi, Th. Proffen, N. Yamada  
 American Crystallographic Association 2006, Honolulu, Hawaii, U.S.A. (Jul. 22-27, 2006)
- [2] Development of large  $m$  neutron supermirror with ion beam sputtering instrument  
 R. Maruyama, D. Yamazaki, T. Ebisawa, M. Hino, K. Soyama

- 9th Surface X-ray and Neutron Scattering (9SXNS), Taipei, Taiwan (Jul. 16-20, 2006)
- [3] **A new neutron reflectometer SUIREN at JRR-3**  
D. Yamazaki, A. Moriai, T. Ebisawa, R. Maruyama, I. Tamura, K. Soyama, M. Takeda, M. Hino  
 The thirteenth International Conference of Small-angle Scattering (SAS2006), Kyoto, Japan (Jul. 9-13, 2006)
- [4] **Neutron Scattering Developments and Initiatives in Asia and Australia  
(Plenary Talk, Invited)**  
Masatoshi Arai  
 American Conference on Neutron Scattering (ACNS2006), St. Charles, Illinois, U.S.A. (Jun. 18-22, 2006)
- [5] **(Organizing committee member and session chair)**  
Masatoshi Arai  
 The Eighth International Conference on Quasi-Elastic Neutron Scattering (QENS2006), Bloomington, Indiana, U.S.A. (Jun. 14-17, 2006)
- [6] **The Status of J-PARC including the design, expected scientific achievements and industrial  
(Invited)**  
Masatoshi Arai  
 Workshop on Opportunity with the European Spallation Source, Lund, Sweden (May 15-16, 2006)
- [7] **J-PARC developments in neutron science  
(Invited)**  
Masatoshi Arai  
 Korean Physical Society Annual Meeting, Pyeongchang, Korea (Apr. 20-21, 2006)
- [8] **Lattice Dynamics of Electron-Doped High- $T_c$  Cuprate  
(Invited)**  
K. Yamada  
 High-Resolution Inelastic X-ray Scattering Workshop, Spring8, Japan (Feb. 13-15, 2006)
- [9] **Dynamical Coupling between Charge and Lattice in HTSC  
(Invited)**  
K. Yamada  
 CREST International Workshop "Highlights and New Perspectives in Strongly Correlated Electronic Systems", Tokyo, Japan (Jan. 11-12, 2006)
- [10] **(Organizing Chair)**  
Masatoshi Arai  
 Innovative Nanoscale Approach to Dynamic Studies of Materials, Okinawa, Japan (Jan. 9-14, 2006)
- [11] **(Organizing Chair)**  
Masatoshi Arai  
 2nd Workshop on Inelastic Neutron Spectrometers 2005 (WINS2005), Cairns, Australia (Dec. 5-6, 2005)
- [12] **High intensity chopper spectrometer 4SEASONS at J-PARC**  
R. Kajimoto, T. Yokoo, K. Nakajima, M. Nakamura, K. Soyama, T. Ino, S. Shamoto, M. Fujita, K. Ohoyama, H. Hiraka, K. Yamada, M. Arai  
 2nd Workshop on Inelastic Neutron Spectrometers 2005 (WINS2005), Cairns, Australia (Dec. 5-6, 2005)
- [13] **Repetition Rate Multiplication Measurement on Chopper Spectrometers at J-PARC**  
M. Nakamura, K. Nakajima, R. Kajimoto, M. Arai  
 2nd Workshop on Inelastic Neutron Spectrometers 2005 (WINS2005), Cairns, Australia (Dec. 5-6, 2005)
- [14] **Initial Growth Processes of Sr and SrO Films on H-terminated Si with Large Mismatch**  
H. Asaoka, T. Yamazaki, S. Shamoto  
 2005 Materials Research Society (MRS) Fall Meeting, Boston, MA, U.S.A. (Nov. 28 – Dec. 2, 2005)
- [15] **Development of neutron supermirror with large-scale ion beam sputtering instrument**  
R. Maruyama, D. Yamazaki, T. Ebisawa, M. Hino, K. Soyama  
 International Conference on Neutron Scattering (ICNS2005), Sydney, Australia (Nov. 27–Dec. 2, 2005)
- [16] **Hidden Mistakes I Made in High- $T_c$  Research  
(Plenary Talk)**  
K. Yamada  
 International Conference on Neutron Scattering (ICNS2005), Sydney, Australia (Nov. 27–Dec. 2, 2005)
- [17] **J-PARC Developments  
(Plenary Talk, invited)**  
Masatoshi Arai

- International Conference on Neutron Scattering (ICNS2005), Sydney, Australia (Nov. 27–Dec. 2, 2005)
- [18] **Recent Development of Magnetic Scattering Studies on Electron-Doped High- $T_c$  Cuprates**  
K. Yamada, M. Fujita, S.H. Lee, D. Petitgrand  
 International Conference on Neutron Scattering (ICNS2005), Sydney, Australia (Nov. 27–Dec. 2, 2005)
- [19] **Structural study on optical recording materials  $\text{Ge}_2\text{Sb}_{2+x}\text{Te}_5$  and  $\text{GeBi}_2\text{Te}_4$**   
S. Shamoto, N. Yamada, T. Matsunaga, T. Proffen  
 International Conference on Neutron Scattering (ICNS2005), Sydney, Australia (Nov. 27–Dec. 2, 2005)
- [20] **Study of the Neutron Guide for the Cold Neutron Double-Chopper Spectrometer at J-PARC**  
R. Kajimoto, M. Nakamura, T. Osakabe, T. J. Sato, K. Nakajima, M. Arai  
 International Conference on Neutron Scattering (ICNS2005), Sydney, Australia (Nov. 27–Dec. 2, 2005)
- [21] **Isotopically concentrated silicon film formation by chemical vapor deposition**  
 H. Yamamoto, H. Ohba, M. Sasase, K. Yamaguchi, K. Shimura, S. Shamoto, A. Yokoyama,  
 K. Hojou  
 American Vacuum Society 52nd International Symposium & Exposition, Boston, MA, U.S.A. (Oct. 30–Nov. 4, 2005)
- [22] **High-Energy Spin Fluctuations in Electron-Doped  $\text{Pr}_{1-x}\text{LaCe}_x\text{CuO}_4$**   
M. Fujita, M. Matsuda, B. Fak, C.D. Frost, K. Yamada  
 The 18th International Symposium on Superconductivity, Tsukuba, Japan (Oct. 24–26, 2005)
- [23] **High-Energy Spin Dynamics of Optimally-Doped  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6.9}$**   
T. Yokoo, M. Arai, T. Egami, D. Reznik, C.D. Frost and F. Dogan  
 24th International Workshop on Low Temperature Physics (LT24), Orlando, Florida, U.S.A. (Aug. 15, 2005)
- [24] **Spin dynamics in the electron-doped high- $T_c$  superconductor**  
 (Invited)  
M. Fujita  
 24th International Conference on Low Temperature Physics, Orlando, U.S.A. (Aug. 10–17, 2005)
- [25] **Impurity effect on spin correlations and excitations in high- $T_c$  cuprates**  
 (Invited)  
K. Yamada  
 4th Asia-Pacific Workshop on Strongly Correlated Systems -Novel Quantum Phenomena in Emergent Materials-, Beijing, China (May 27–30, 2005)
- [26] **Recent studies on the dynamics of super-ionic  $\text{AgI-AgS-AgPO}$  glasses**  
 (Invited)  
M. Arai  
 Hahn-Meitner-Institute Berlin seminar, Berlin, Germany (May 5, 2005)
- [27] **Sample Environment at KENS and Strategy toward J-PARC**  
T. Yokoo, K. Nakajima, M. Arai, T. Kamiyama, W. Utsumi, R. Kajimoto, K. Suzuya,  
A. Moriai, S. Torii,  
 International Collaboration on Advanced Neutron Sources (ICANS), Santa Fe, New Mexico, U.S.A. (Apr. 25–29, 2005)
- [28] **Neutron Scattering Study of Commensurate Spin Fluctuations in the Electron-Doped High- $T_c$  Superconductors**  
 (Invited)  
M. Fujita  
 International Symposium on Research Reactor and Neutron Science -In Commemoration of the 10th Anniversary of HANARO-, Daejeon, Korea (Apr. 11–13, 2005)
- [29] **電子ドープ系の磁気励起と超伝導**  
藤田全基  
 IMR ワークショップ, 仙台市 (2006年5月25日–8月26日)
- [30]  **$\text{TbMnO}_3$ の低エネルギー磁気励起**  
梶本亮一, 三井由佳利, 吉澤英樹, 阿曾尚文, 新谷寛, 木村剛, 十倉好紀  
 日本物理学会第61回年次大会, 愛媛大・松山大 (2006年3月27日–30日)
- [31] **イオンビームスペッタ装置による高反射率中性子スーパーミラーの開発**  
丸山龍治, 山崎大, 海老澤徹, 曽山和彦  
 日本原子力学会 2006 年春の年会, 日本原子力研究開発機構大洗研究開発センター (2006 年 3 月 24 日–26 日)

- [32] 電子ドープ型高温超伝導体における磁気揺らぎの研究  
藤田全基  
 第四回学術創成会議「パルス中性子源を活用した量子機能発現機構に関する融合研究」つくば市  
 (2006年3月23日-3月24日)
- [33] カーボンナノファイバー分散による高熱伝導性SiC/SiC複合材料の作製  
 田口富嗣, 井川直樹, 實川資朗, 山本博之, 社本真一  
 日本セラミックス協会2006年年会, 東京大学, 駒場 (2006年3月14日-16日)
- [34] 高強度パルス中性子で見えてくるナノ領域の全局所構造  
 (招待講演)  
社本真一  
 理研シンポジウム「電子複雑系科学」研究会, 理化学研究所, 和光 (2006年2月18日)
- [35] 金研・化研中性子グループの5年間の成果と今後の展開  
山田和芳  
 学術創成研究「新しい研究ネットワークによる電子相関系の研究-物理学と化学の真の融合を目指して」  
 全体会議, 犬山ホテル (2006年1月30日-2月1日)
- [36] 金研三軸型中性子分光器AKANEの建設と, それを用いたホールドープ型高温超伝導体における  
 Ni不純物効果の研究  
平賀晴弘  
 科研費特定領域「異常量子物質の創製-新しい物理を生む新物質-」2005年成果報告会, 仙台(2006年  
 1月5日-1月7日)
- [37] Si基板上に作製した鉄シリサイド薄膜の発光特性の向上について  
 山口憲司, A. Zhuravlev, 志村憲一郎, 山本博之, 社本真一, 北條喜一,  
 第16回日本化学会関東支部茨城地区研究交流会, 茨城県東海村 (2005年11月25日)
- [38] 中性子散乱実験による高温超伝導体の研究-磁気相関と超伝導の普遍的関係-  
藤田全基  
 量子ビームによる高温超伝導機構解明研究会, 茨城県五浦 (2005年11月1日-11月2日)
- [39] 高温超伝導体の研究に向けた中性子散乱装置の開発  
梶本亮一  
 量子ビームによる高温超伝導機構解明研究会, 茨城県五浦 (2005年11月1日-11月2日)
- [40] 四極子秩序化合物Hob<sub>2</sub>C<sub>2</sub>での磁気励起  
大山研司, 東方綾, 小野寺秀也  
 日本物理学会秋季大会, 同志社大京田辺キャンパス (2005年9月19-22日)
- [41] Mn酸化物ナノ粒子の局所構造解析  
 飯久保智, 樹神克明, 社本真一, 古屋伸秀樹, 竹内謙, 小原真司  
 日本物理学会秋季大会, 同志社大京田辺キャンパス (2005年9月19-22日)
- [42] YBa<sub>2</sub>Cu<sub>3</sub>O<sub>6.9</sub>の高エネルギー領域におけるスピントルボン  
横尾哲也, 新井正敏, 江上毅, D. Reznik, C.D. Frost, F. Dogan  
 日本物理学会秋季大会, 同志社大京田辺キャンパス (2005年9月19-22日)
- [43] 真空散乱槽内に設置する場合の検出器配置  
梶本亮一  
 検出器を真空散乱槽外に設置するチョッパー分光器の検出器配置に関する検討会  
 高エネルギー加速器研究機構, つくば (2005年9月12日)  
 KEK Proceedings 2005-9 (2005) 21-24
- [44] チョッパー分光器における検出器配置～これまでのまとめ～  
中島健次  
 検出器を真空散乱槽外に設置するチョッパー分光器の検出器配置に関する検討会  
 高エネルギー加速器研究機構, つくば (2005年9月12日)  
 KEK Proceedings 2005-9 (2005) 1-8
- [45] 要求される検出器配置～3d遷移金属化合物を中心～  
横尾哲也  
 検出器を真空散乱槽外に設置するチョッパー分光器の検出器配置に関する検討会  
 高エネルギー加速器研究機構, つくば (2005年9月12日)

KEK Proceedings 2005-9 (2005) 33-36

[46] CuGeO<sub>3</sub>の非整合磁気相関

梶本亮一, 富安啓輔, 伊藤晋一, M.J. Bull, P. Manuel, 加倉井和久, 原田勲, 新井正敏,  
藤田全基, 西正和

学術創成研究「パルス中性子源を活用した量子機能発現機構に関する融合研究」第3回研究会, 高エネ  
ルギー加速器研究機構, つくば (2005年8月17日-19日)

[47] 古くて新しいセラミックナノチューブ

(招待講演)

社本真一

関西研セミナー, 原研関西研放射光科学研究所 (2005年6月14日)

[48] 遷移金属酸化物のナノ構造 一結晶とアモルファスの狭間-

(招待講演)

社本真一

研究会「深い3d準位のもたらす新しい化学と物理:新物質開発と化学的・物理的機能の探索」, 京大化研  
共同研究棟 (2005年5月20日)

[49] 対相関関数を用いた構造解析に対するナノ粒子の有限サイズ効果

樹神克明, 飯久保智, 田口富嗣, 社本真一

ナノ学会第4回大会, 京都大学百周年時計台記念館 (2005年5月19日-21日)

[50] マンガン酸化物ナノ粒子の局所構造解析

飯久保智, 古屋伸秀樹, 竹内謙, 小原真司, C.-K.Loong, 樹神克明, 社本真一

ナノ学会第4回大会, 京都大学百周年時計台記念館 (2005年5月19日-21日)

[51] SiC及びSiC-SiO<sub>2</sub>ナノチューブの創製とその微細構造観察

田口富嗣, 井川直樹, 山本博之, 社本真一

ナノ学会第4回大会, 京都大学百周年時計台記念館 (2005年5月19日-21日)

[52] 光相変化記録材料Ge<sub>2</sub>Sb<sub>2</sub>Te<sub>5</sub>の結晶相中のナノ構造

社本真一, 田口富嗣, 山田昇, 松永利之, トーマス・プロッフェン, 江上毅

ナノ学会第3回大会, 仙台市民会館 (2005年5月8日-10日)

プレス発表

四季分光器用1次元位置敏感型検出器 一長尺型<sup>3</sup>He中性子検出器-

J-PARC News 第15号

特許出願

パルス中性子非弾性散乱実験の高効率測定方法

平成18年5月10日特願平2006-131238号として特許出願

発明者:新井正敏, 中村充孝, 梶本亮一, 中島健次

図書

[1] 科研費特別推進研究・研究会「量子ビームによる高温超伝導機構の解明」講演集

梶本亮一, 新井正敏(編)

JAEA-Review 2006-006

[2] 2重ハニカム格子超伝導体

社本真一

超伝導ニュース 64 11-14 応用物理学会超伝導分科会 2006年1月17日発行

[3] 中性子散乱実験試料環境研究会

横尾哲也

KEK proceedings 2005-16 (2006)

会議開催報告

- [1] **WINS 2005 Held at Cairns, Australia**  
Shin-ichi Shamoto  
Neutron News 17-3 (2006) 5-6
- [2] **2nd Workshop on Inelastic Neutron Spectrometers 2005 (WINS2005)**  
中島健次  
中性子科学会誌「波紋」16 (2006) 82-83
- [3] 科研費特別推進研究研究会「量子ビームによる高温超伝導機構の解明」  
横尾哲也  
中性子科学会誌「波紋」16 (2006) 84
- [4] 国際会議Innovative Nanoscale Approach to Dynamic Studies of Materials報告  
中村充孝  
中性子科学会誌「波紋」16 (2006) 128

## 5. 研究組織の役割分担

氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担等
新井 正敏	日本原子力研究開発機構・量子ビーム応用研究部門・研究主席	全体統括
横尾 哲也	高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・助手	装置開発・中性子散乱実験
梶本 亮一	日本原子力研究開発機構・量子ビーム応用研究部門・研究員	装置開発・中性子散乱実験
中島 健次	日本原子力研究開発機構・量子ビーム応用研究部門・研究副主幹	装置開発・中性子散乱実験
社本 真一	日本原子力研究開発機構・量子ビーム応用研究部門・研究主幹	試料合成・中性子散乱実験
山田 和芳	東北大学・金属材料研究所・教授	試料合成・中性子散乱実験
藤田 全基	東北大学・金属材料研究所・助手	試料合成・中性子散乱実験
猪野 隆	高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・助手	中性子偏極子開発
曾山 和彦	日本原子力研究開発機構・量子ビーム応用研究部門・研究主幹	中性子ミラー開発
中村 充孝	日本原子力研究開発機構・量子ビーム応用研究部門・研究員	装置開発・中性子散乱実験
相澤 一也	日本原子力研究開発機構・量子ビーム応用研究部門・研究副主幹	工程調整
大山 研司	東北大学・金属材料研究所・助教授	装置開発・中性子散乱実験
平賀 晴弘	東北大学・金属材料研究所・助手	装置開発・中性子散乱実験
朝岡 秀人	日本原子力研究開発機構・量子ビーム応用研究部門・研究副主幹	試料合成・中性子散乱実験
樹神 克明	日本原子力研究開発機構・量子ビーム応用研究部門・研究員	試料合成・中性子散乱実験
稻村 泰弘	日本原子力研究開発機構・量子ビーム応用研究部門・博士研究員	装置開発・中性子散乱実験
今井 良宗	日本原子力研究開発機構・量子ビーム応用研究部門・博士研究員	試料合成・中性子散乱実験

This is a blank page.

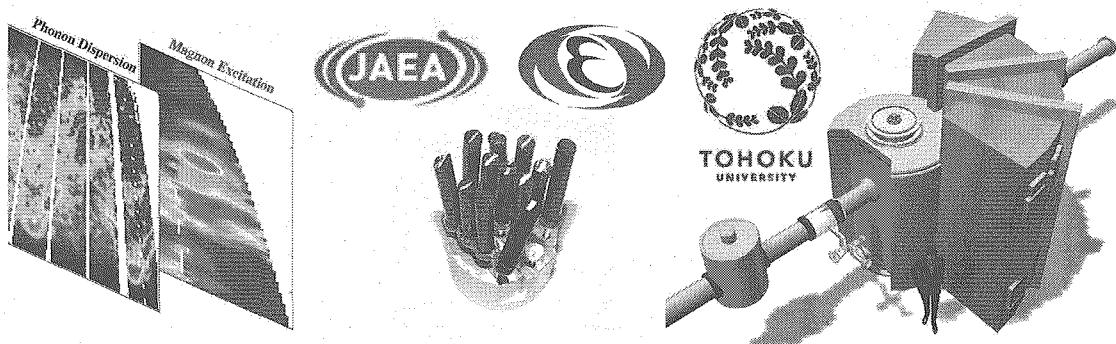
## 6. 說明資料

This is a blank page.

## 4次元空間中性子探査装置の開発と 酸化物高温超伝導機構の解明（2005–2009）

特別推進研究代表 新井正敏

- 1)世界最強の革新的中性子非弾性散乱装置(四季)の建設とJ-PARCの利用
- 2)関連機器の開発(チヨッパー、検出器、光学素子、偏極子、ソフトウェア)
- 3)高品質、多量、多彩な試料の準備と、他に無い試料の創製
- 4)系統だった研究と外部組織との連携(放射光、物性測定、理論)
- 5)焦点を絞った観測実験
- 6)現行研究の展開
- 7)酸化物超伝導機構解明を飛躍的に前進させる。



### 組織と役割分担

装置開発  
試料創製

氏名	所属研究機関・部局・職	役割分担等
新井 正敏	日本原子力研究開発機構・量子ビーム応用研究部門・研究室主任	全体統括
横尾 哲也	高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・助手	装置開発・中性子散乱実験(検出器を担当)
梶本 亮一	日本原子力研究開発機構・量子ビーム応用研究部門・研究員	装置開発・中性子散乱実験(四季 装置責任者)
中島 健次	日本原子力研究開発機構・量子ビーム応用研究部門・研究副主幹	装置開発・中性子散乱実験
社本 真一	日本原子力研究開発機構・量子ビーム応用研究部門・研究室幹	試料合成・中性子散乱実験
山田 和芳	東北大学・金属材料研究所・教授	試料合成・中性子散乱実験
藤田 金基	東北大学・金属材料研究所・助手	試料合成・中性子散乱実験
猪野 隆	高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・助手	中性子偏極子開発
曾山 和彦	日本原子力研究開発機構・量子ビーム応用研究部門・研究生幹	中性子ミラー開発
中村 充孝	日本原子力研究開発機構・量子ビーム応用研究部門・研究員	装置開発・中性子散乱実験(偏極子、チヨッパー担当) (中性子偏極子および新型チヨッパーの開発が本格化し、人員の補強が必要なため)
相澤 一也	日本原子力研究開発機構・量子ビーム応用研究部門・研究副主幹	工程調整 J-PARCの建設の進展に伴い他の機器・装置との工程等を調整する必要が生じたため
大山 研司	東北大学・金属材料研究所・助教授	装置開発・中性子散乱実験(ガイド管担当) 中性子ガイド管の開発が本格化し、人員の増強が必要なため
平賀 晴弘	東北大学・金属材料研究所・助手	装置開発・中性子散乱実験 中性子ガイド管の開発が本格化し、人員の増強が必要なため
朝岡 秀人	日本原子力研究開発機構・量子ビーム応用研究部門・研究副主幹	試料合成・中性子散乱実験 前年度導入したCZ炉を使用した試料合成が本年度より本格化するため
樹神 克明	日本原子力研究開発機構・量子ビーム応用研究部門・研究員	試料合成・中性子散乱実験 前年度導入したCZ炉を使用した試料合成が本年度より本格化するため

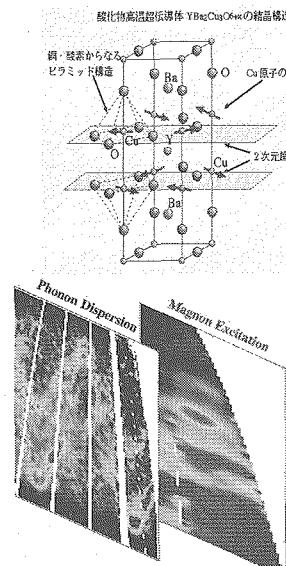
+3PD  
稻村(ソフト)  
今井(試料)  
新人(東北大)

+  
坂井(事務)

## 高温超伝導機構解明のキーポイント

### 超伝導機構の2大課題

- 磁気的相互作用(磁気励起)
- 電子一格子相互作用(格子振動)

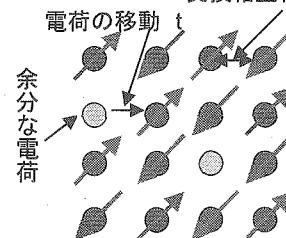


機構のシナリオ  
→

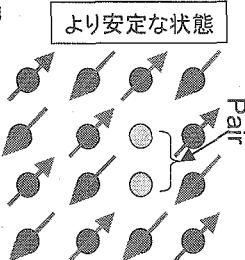
中性子による  
( $\text{Q}_x, \text{Q}_y, \text{Q}_z, \text{E}$ )  
4次元空間の  
情報が不可欠  
磁気揺らぎ・  
格子振動観測

t-Jモデル

交換相互作用  $J$



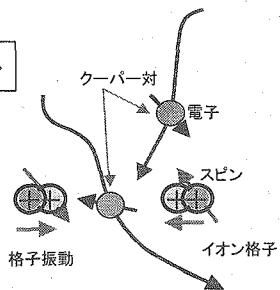
より安定な状態



特異な電子状態(特異なフェルミ面の形成)  
異方的な超伝導(d波)

BCSモデル

あるいは  
両者の  
相乗効果  
の可能性



電子の運動エネルギーの増加を格子  
振動の運動エネルギーの減少で安定化:  
特定のフォノンが重要 (cf. MgB<sub>2</sub>)

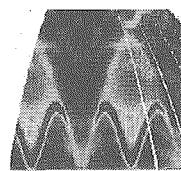
格子振動・磁気励起  
の広域の微弱な信号

J-PARC + 四季

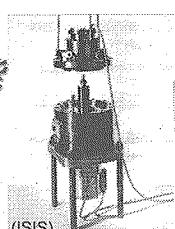
大強度中性子が必要

## 四季の性能と実現のための開発

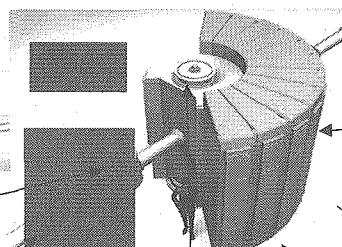
現存装置の  
100倍の性能



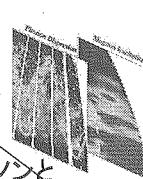
先進解析ソフト  
(4次元空間解析)



革新的  
チョッパー  
(5倍)

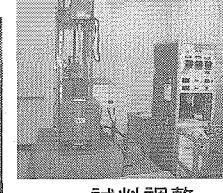
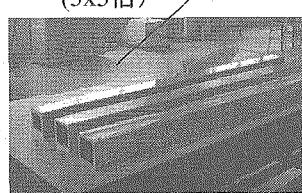


長尺検出器  
(分解能、感度、  
大面積)



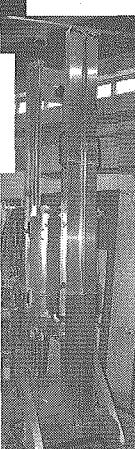
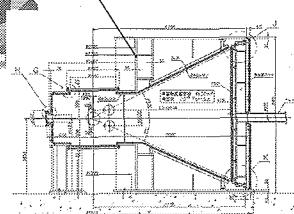
J-PARC  
(6倍)

光学素子(ミラー)  
(3x3倍)



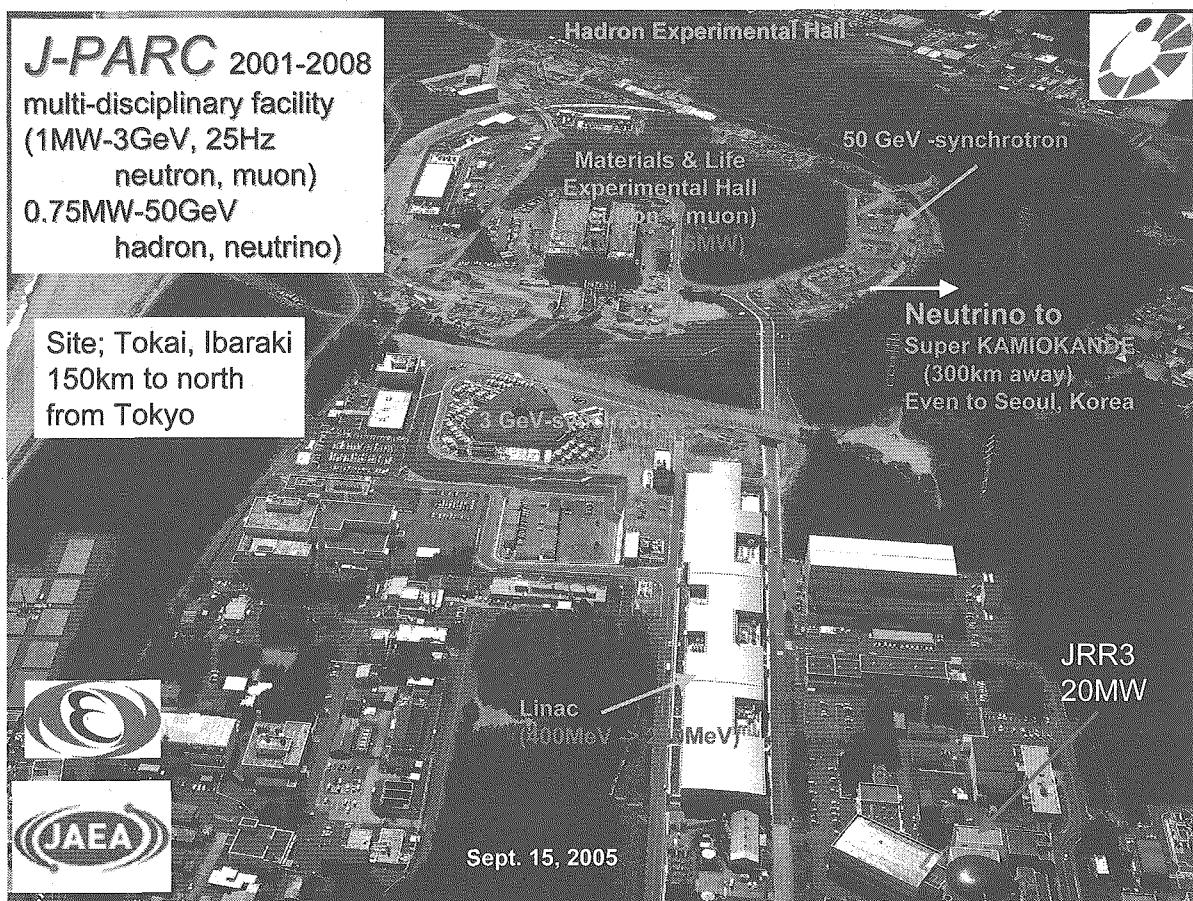
協力と連携

フォノンと  
磁気励起  
の分離

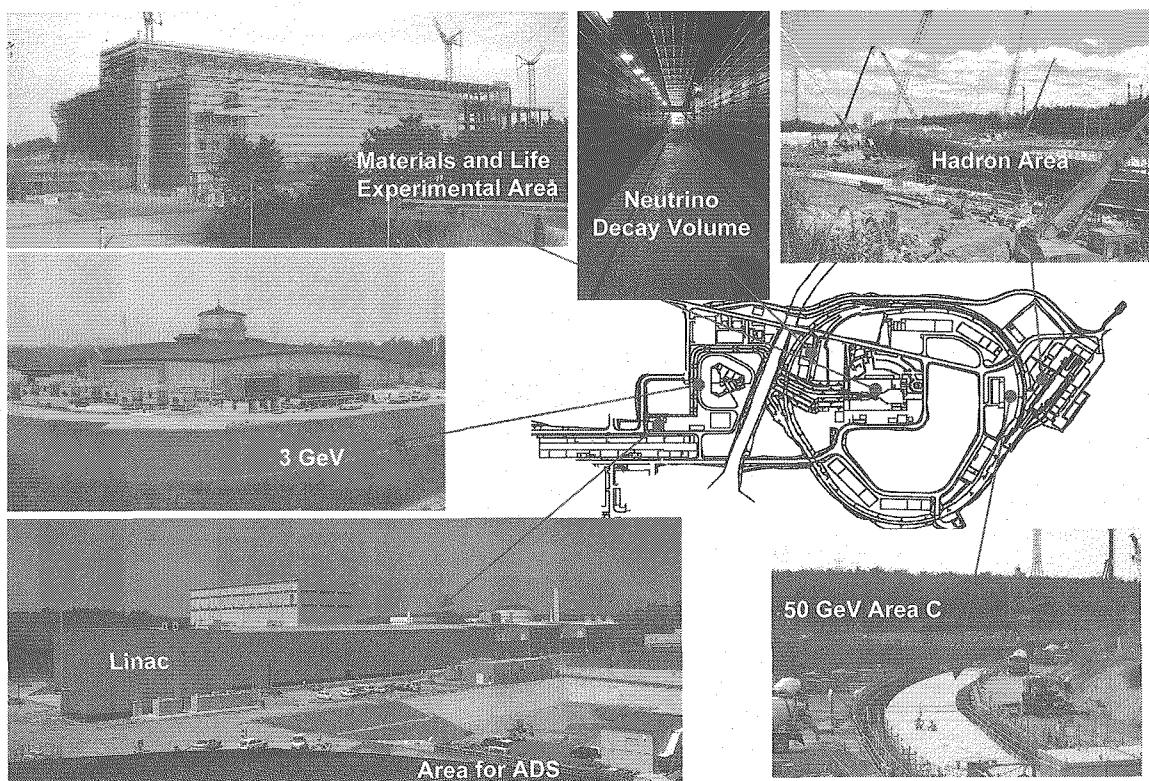


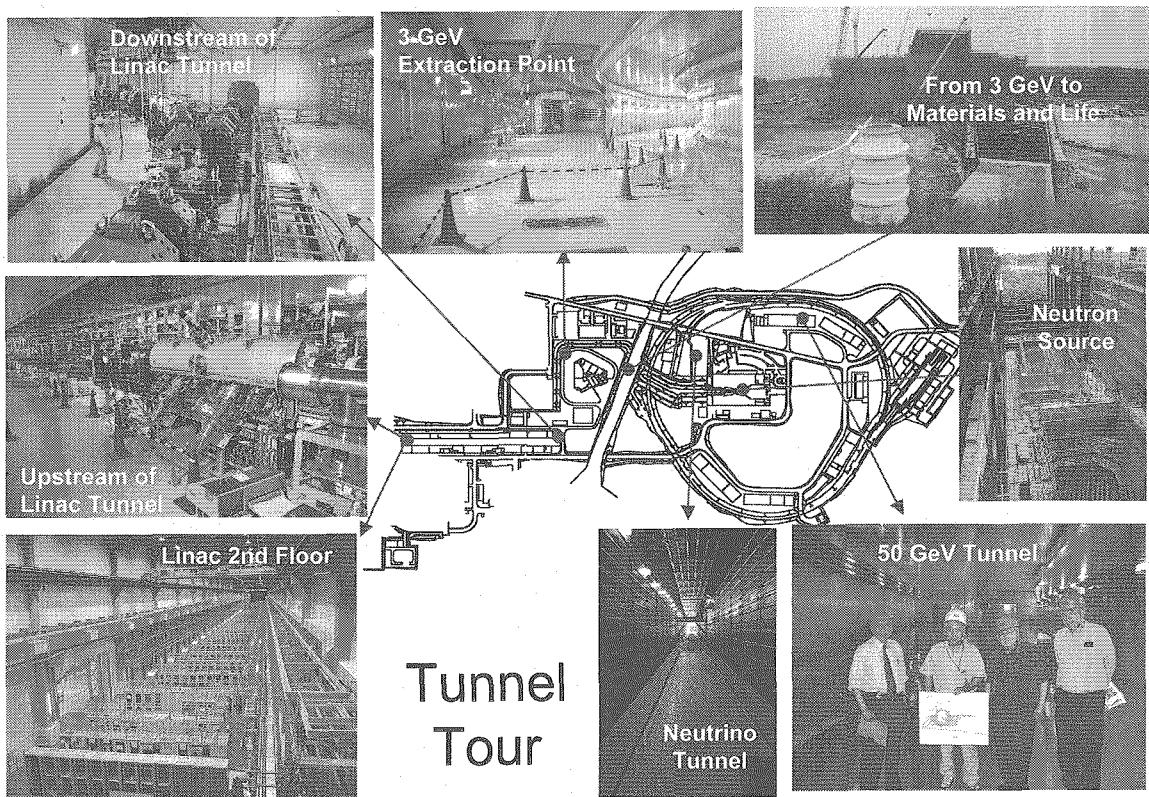
偏極子

装置設計  
(新概念)

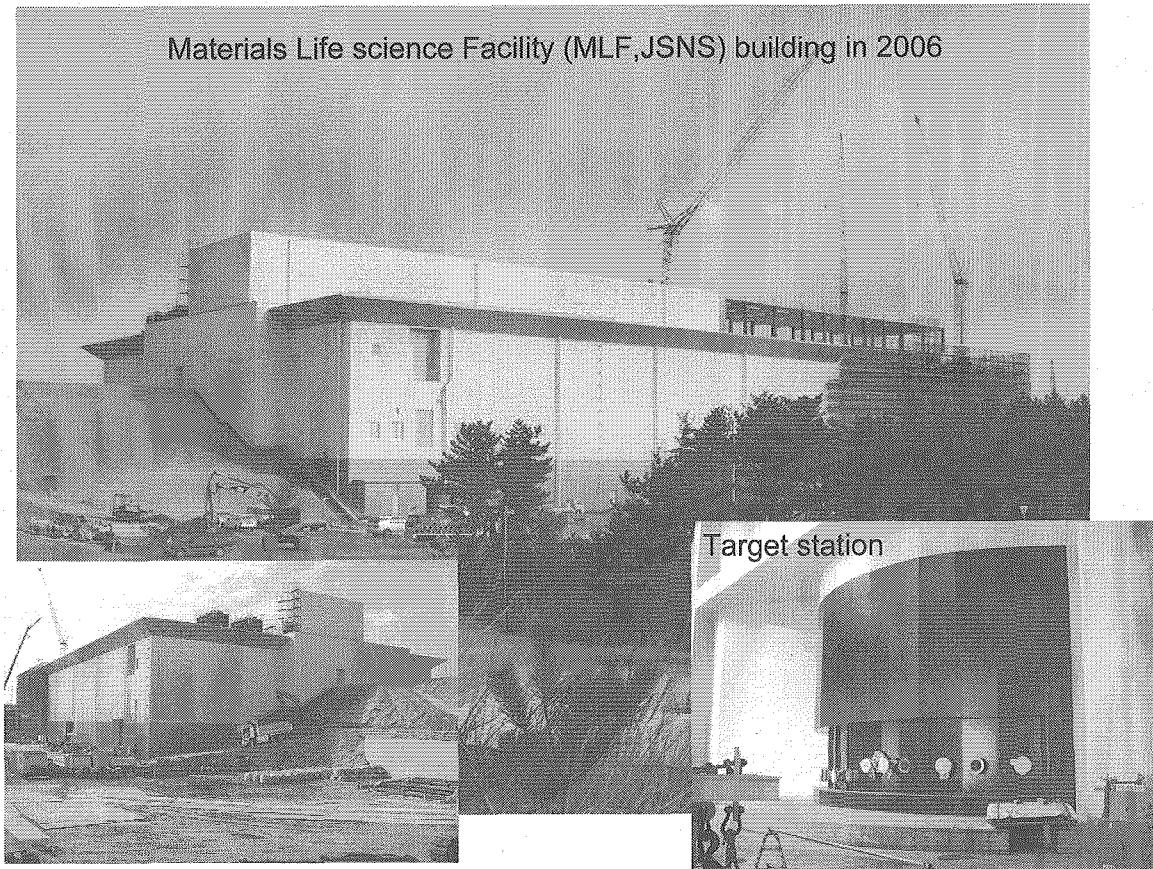


## Construction for Buildings



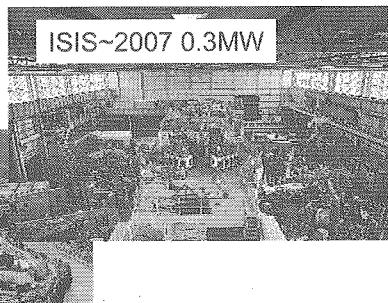


Materials Life science Facility (MLF,JSNS) building in 2006



## 新型中性子源の建設とHTC・SCにおける熾烈な国際的競争

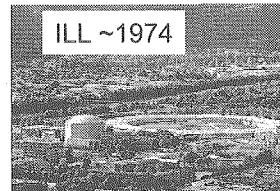
G.Appli,  
S.Hayden



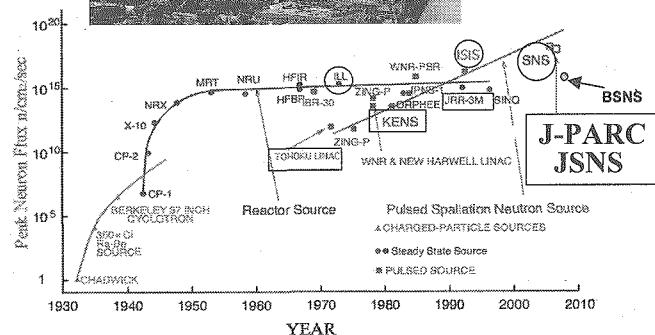
H.Mook  
T.Egami



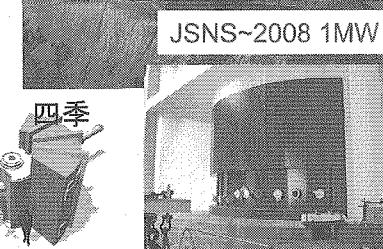
ARCS



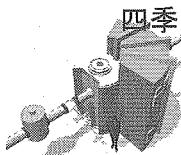
SNS~2006 1.4MW



J-PARC



各国が大強度中性子源の建設をすすめている。  
HTC・SCの解明はしのぎを削る目玉である。

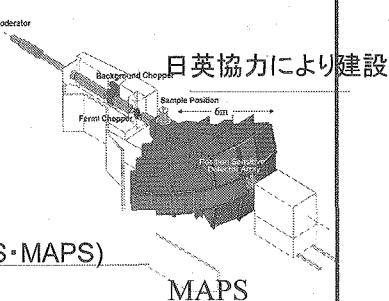


### 四季の建設:

現存の世界最高性能(ISIS・MAPS)の装置の100倍以上を目指す。

- 1) J-PARC中性子源(1MW): ISISの 6倍
- 2) 中性子輸送系(ミラー): 3倍
- 3) マジックチョッパー(多重入射エネルギー): 5倍
- 4) 集光系: 3倍

合計で100-300倍(比ISIS・MAPS)



### 装置建設の採択

J-PARC装置計画検討委員会による審査で採択された。(2006年 1月)  
(提案から採択まで1年間)

### 試料準備環境の整備

JAEA(社本) 2橋円-FZ, 4橋円-FZ, ISTEC-CZ  
東北大(山田)レーザー加熱炉(2006)

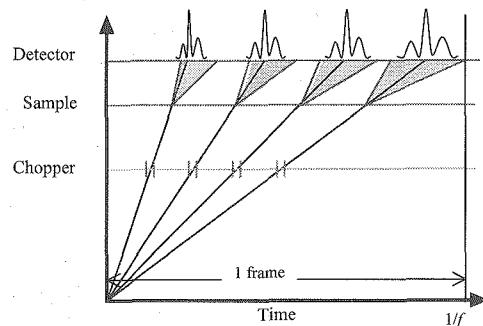
J-PARC建設のスケジュール (ビーム利用時期)  
特推申請時よりも半年間遅れている。

	2004	2005	2006	2007	2008	2009
J-PARC	Piling	Construction	建屋竣工▲	Off-Beam Commissioning	First beam▼ Operation	
四季					On-Beam 100kW	200kW
試料準備		特推開始▲				
実験開始		装置審査				
SNS		Construction	Commissioning	Operation	100kW	

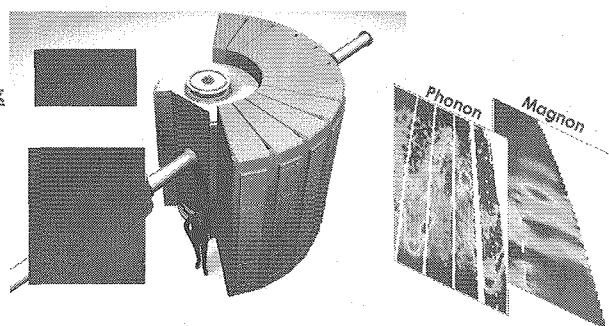
## 4次元空間中性子探査装置(四季) - 4d Space Access Neutron Spectrometer (4SEASONS) -

**特徴**

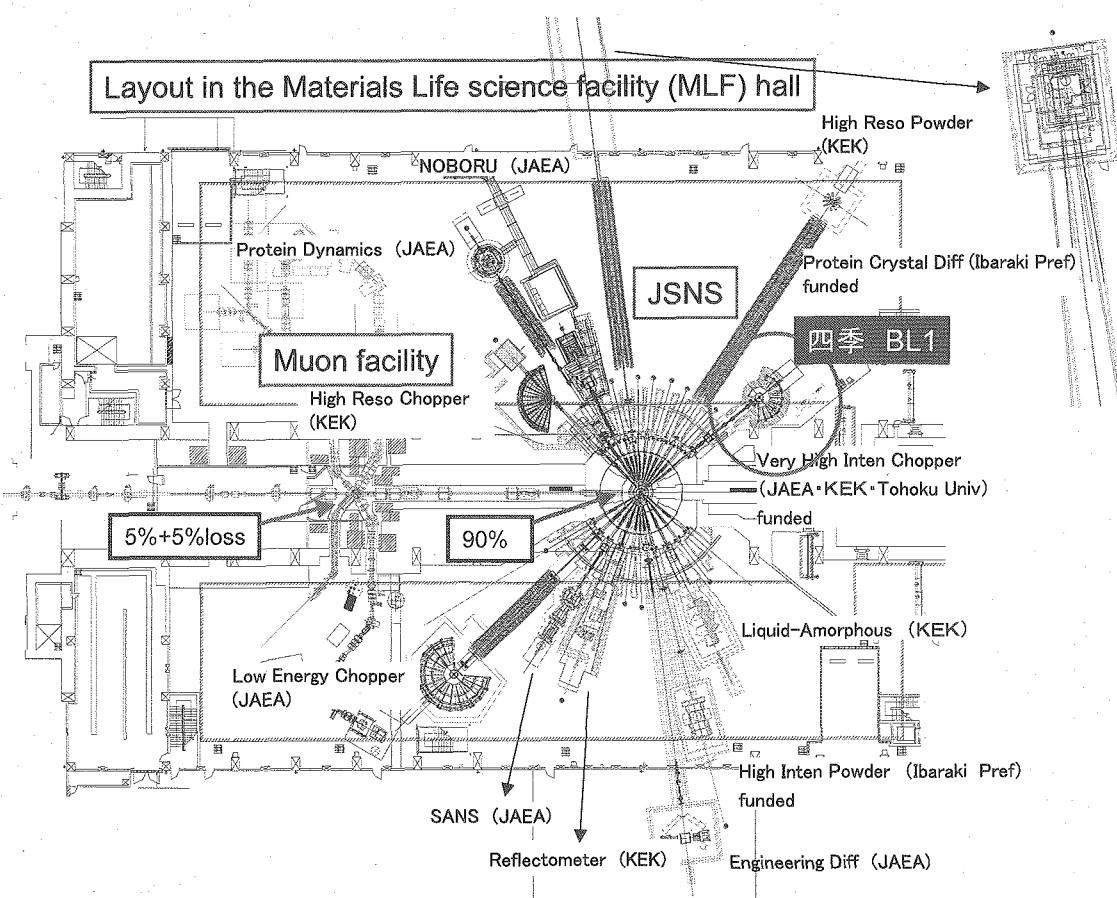
- 中分解能・大強度チョッパー型非弾性散乱装置
- 4次元運動量・エネルギー空間の高効率測定
  - ◆ Repetition Rate Multiplication (RRM) 測定による同時複数 $E_i$ 高効率測定
  - ◆ 高効率中性子輸送・集光系

**研究対象**

- 高温超伝導機構の解明
- 強相関電子系における新奇量子現象の解明

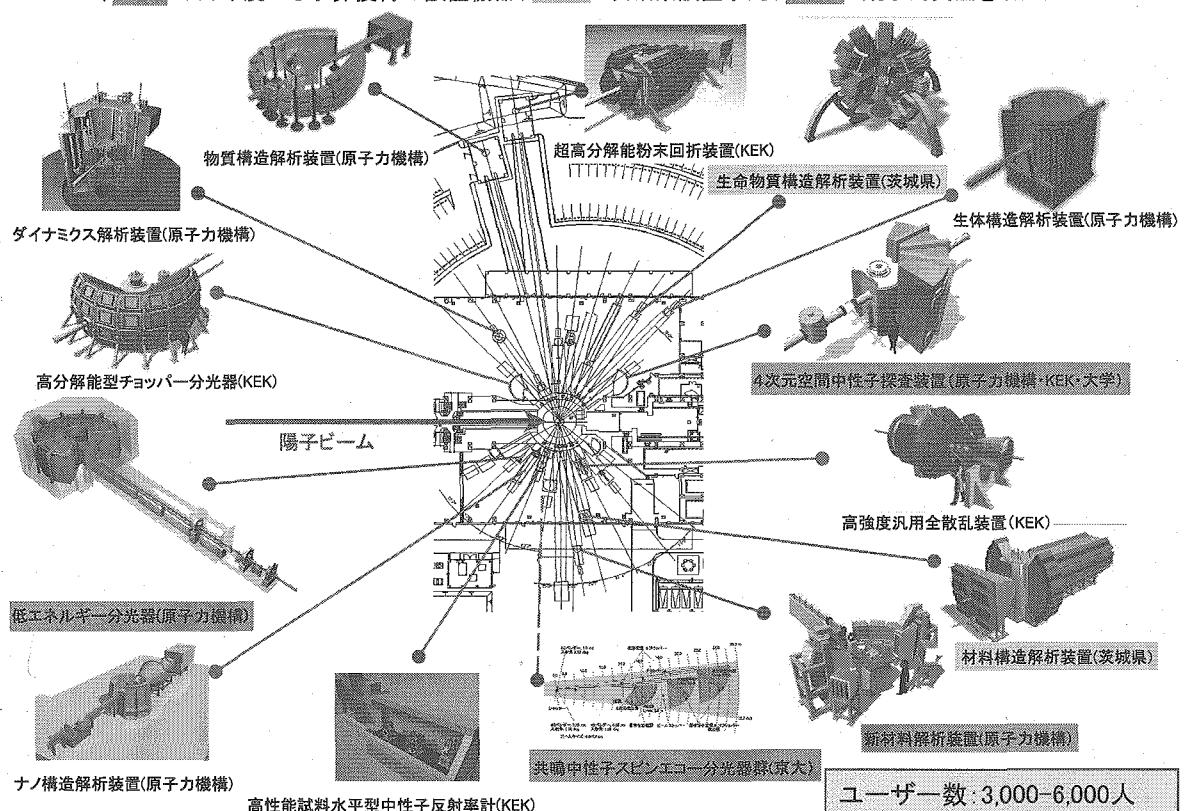
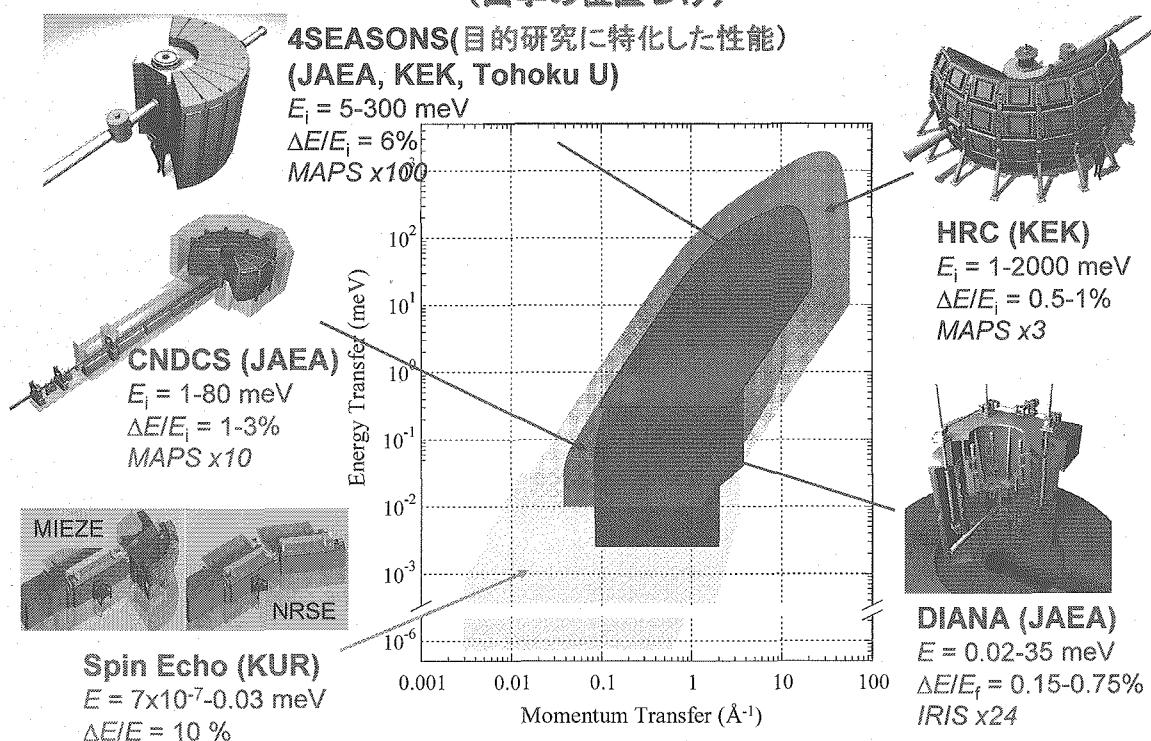
**主な仕様(分解能を適度に下げ、強度を最大限)**

- ビームライン: BL1 結合型減速材
- 各飛行距離:  $L_1 = 18\text{ m}$ ,  $L_2 = 2.5\text{ m}$ ,  $L_3 = 1.8\text{ m}$
- 入射エネルギー範囲:  $5 < E_i < 300\text{ meV}$
- エネルギー分解能:  $\Delta\hbar\omega/E_i = 5\text{--}6\%$  ( $\hbar\omega = 0$ )

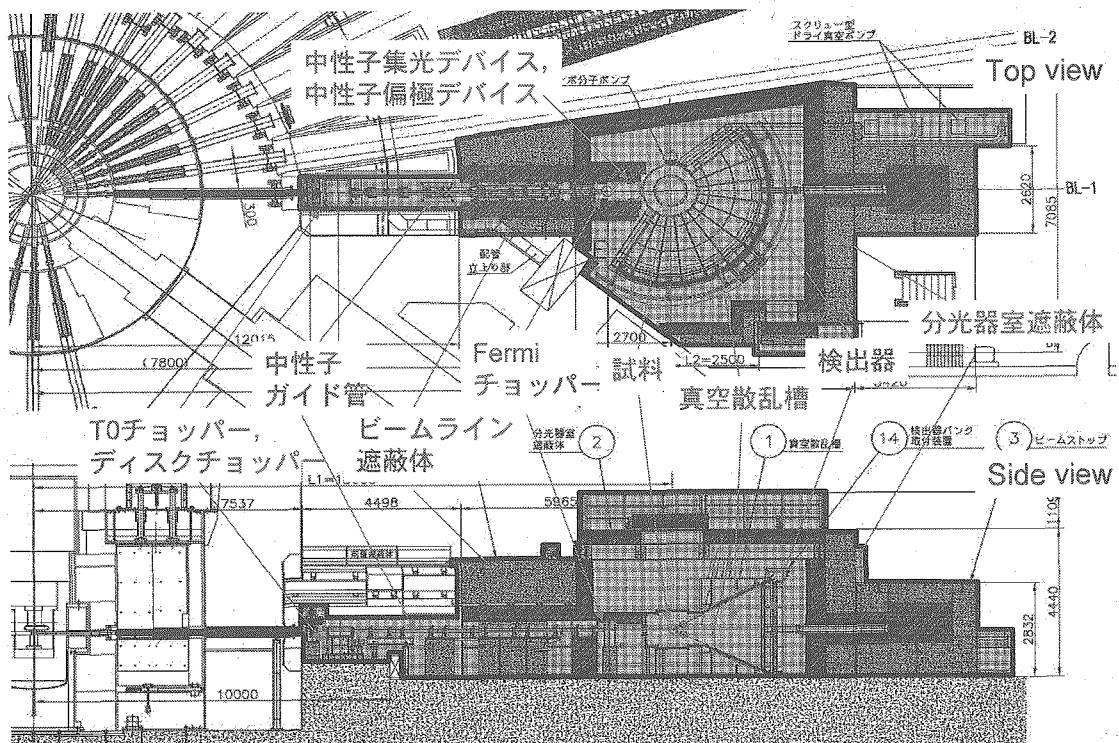


## J-PARC/中性子源において設置計画中のビームライン機器

(■ 2006年度から予算獲得の設置機器、■ 茨城県設置予定、■ 競争的資金を活用)

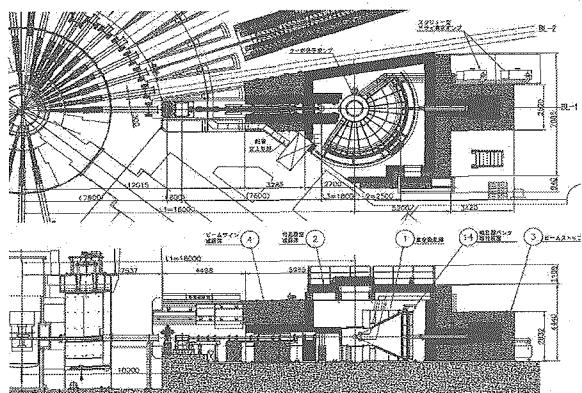
J-PARC/MLF Day-1 中性子非弾性散乱装置  
(四季の位置づけ)

## 四季・全体図

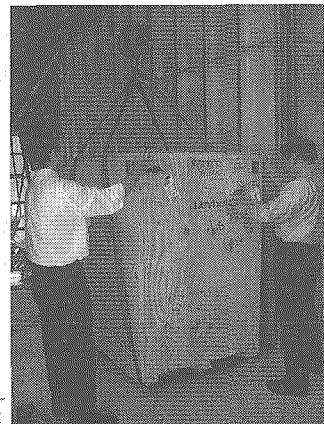
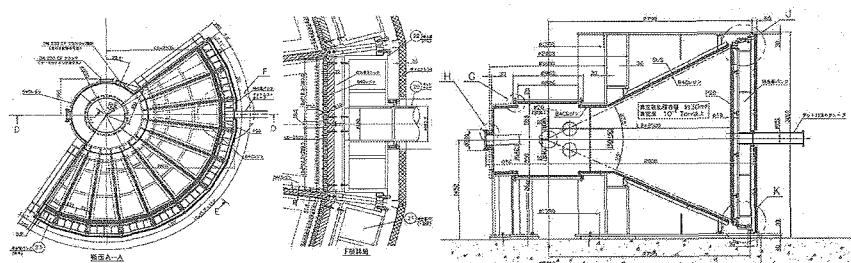


## 分光器本体

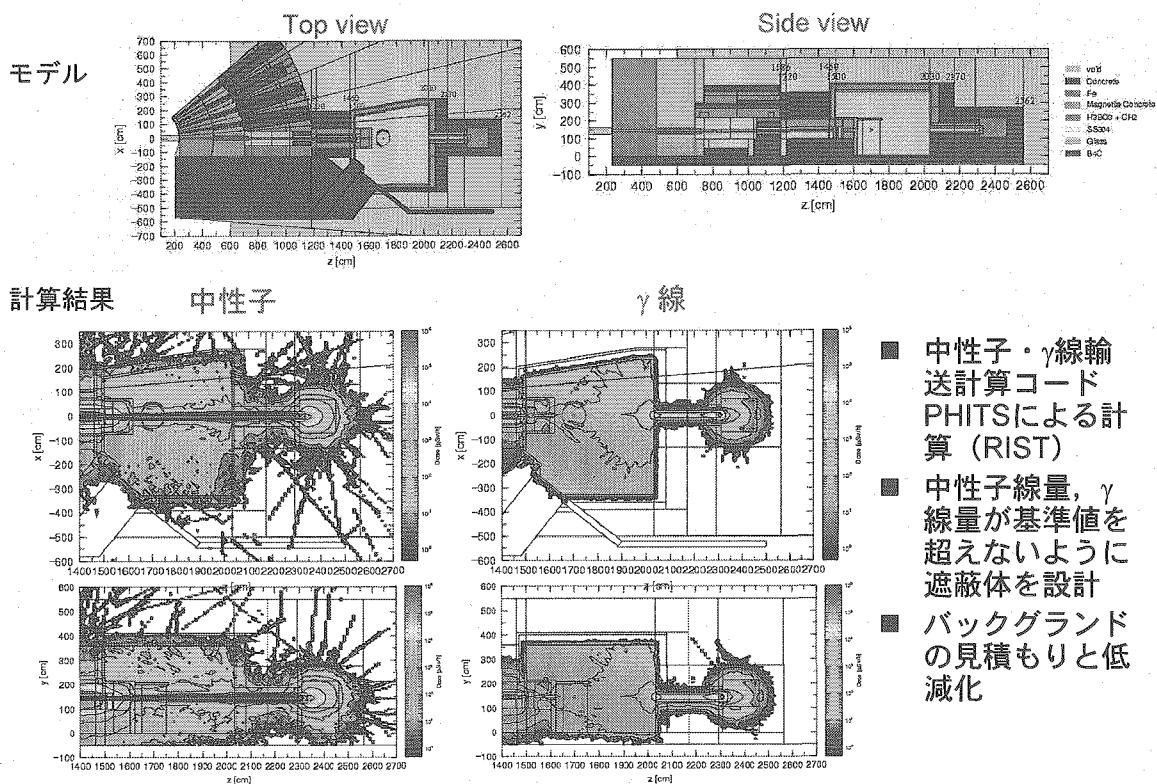
全体設計：分光器を具体化（神戸製鋼所）



真空散乱槽排気用ポンプの購入

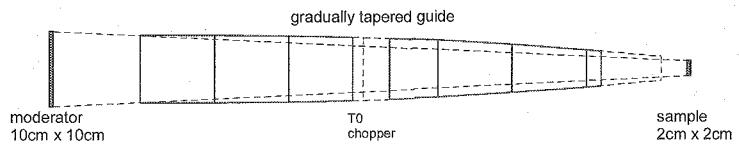


## 遮蔽計算（線量基準、観測バックグラウンド）

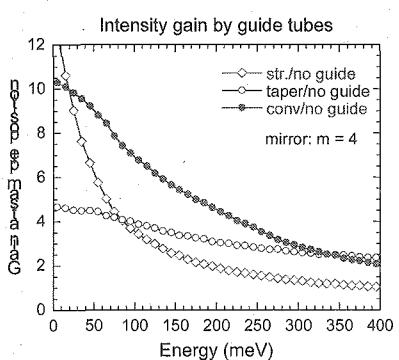
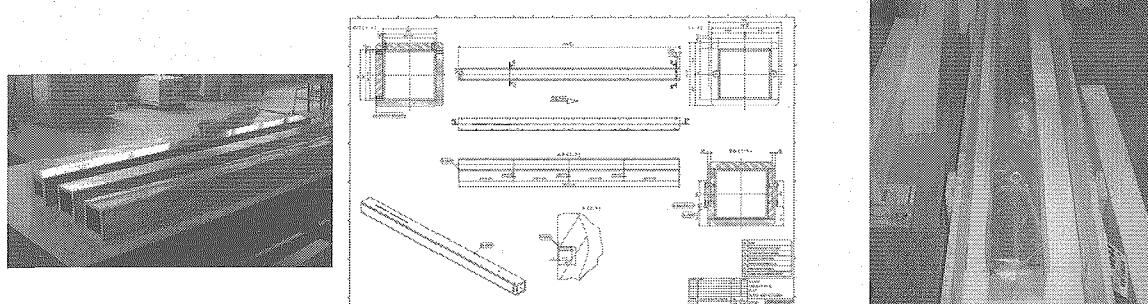


## 中性子輸送系

- 中性子ガイド管のデザイン検討
  - 4Q<sub>c</sub>Niスーパーミラーを採用し、ゆるやかな収束形状をもたせることにより、150meVの中性子に対し5倍程度のゲインを得ることが可能



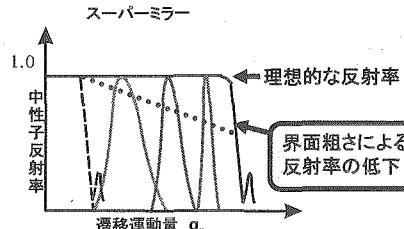
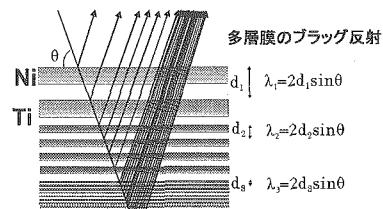
- シャッター部ガイド管の製作
  - シャッター内埋め込み機器設置スケジュール(H18.6)に合わせ、ガイド管のうちシャッター部のみ先行して製作 (SwissNeutronics社製)



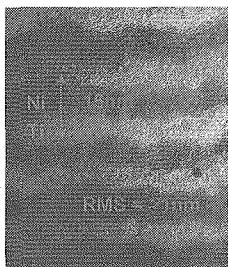
**世界最高性能の中性子スーパーミラーを開発  
—J-PARC四季の中性子ビームの質・量の飛躍的向上に向けて—**

**研究開発の目的・経緯**

J-PARCの分光器「四季」へ損失無く中性子を輸送し、集光する世界最高性能スーパーミラーを開発し、中性子ビームの質と量の飛躍的向上を目指す。

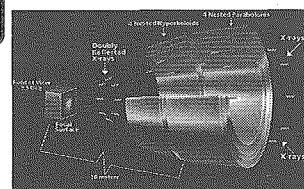
**多層膜スーパーミラー開発の課題**

- 結晶粒、界面拡散による界面粗さの増加
- 多層膜の剥離
- 大面積化

**研究目的**

- (1)原子オーダーの超平滑界面多層膜
- (2)数千層にわたる積層
- (3)実用のための大面積化

電子ビーム蒸着、マグネットロンスパッタ等では界面粗さが增大はく離発生

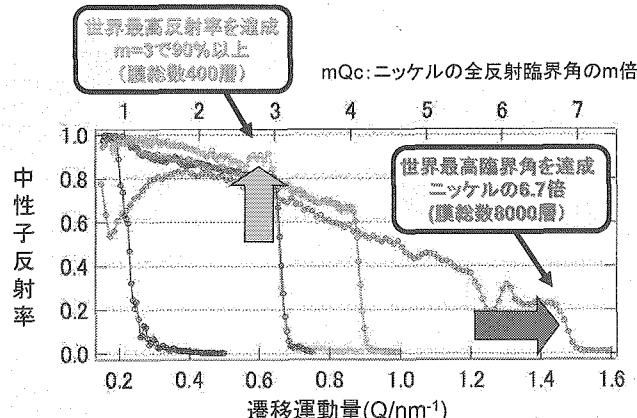
**ビーム集光技術の開発**

曲面多層集光ミラーの開発を進めている。

(X-ray telescope CHANDRA, NASA/CXC/SAO)

**特筆すべき成果**

8000層からなるナノ多層膜を原子オーダーの界面粗さで、大面積を実現



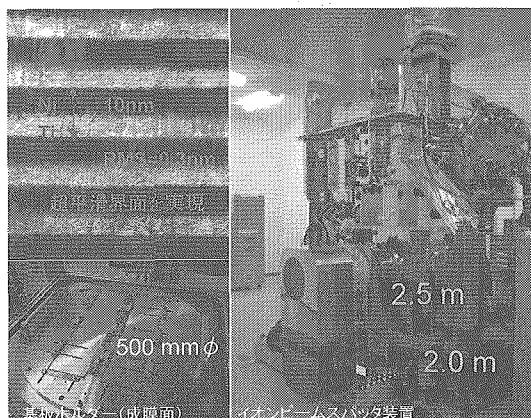
原子オーダーで急峻な界面を創成した。

- イオンビームスパッタ法の採用
- 化合物薄膜化による界面粗さ低減
- イオンビームで界面粗さを低減

J-PARC対応大面積ミラーを実現した。

- マスク精密制御による大面積均一成膜
- イオン源の長寿命化対策

イオンビームスパッタ法とイオンポリッシュ法複合成膜によるNi/Ti多層膜のTEM断面写真

**国内外での成果の位置づけ**

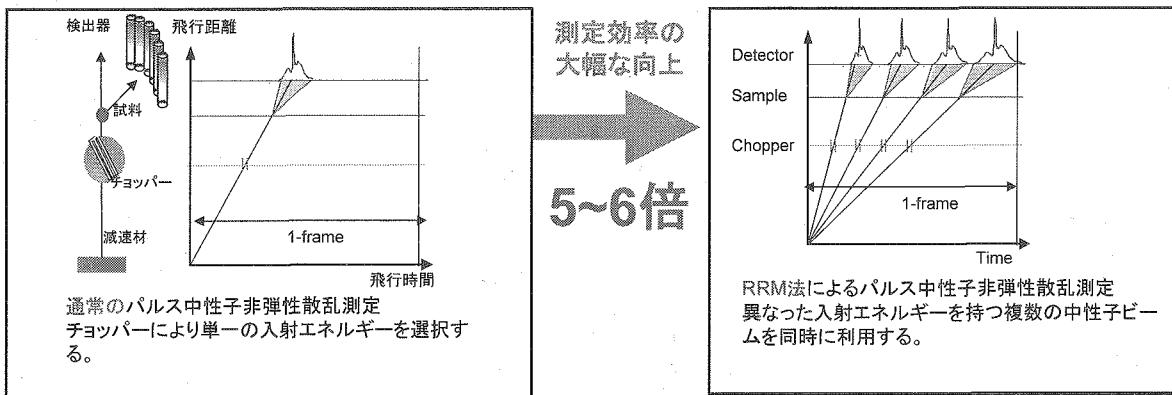
○3Qc~4Qc(400~1200層)が最大臨界角のガイド管

世界最高臨界角6.7Qc(8000層)を達成。

○従来に比べ、短波長領域と、高角度領域へ反射性能が拡大。

○J-PARCの四季等の中性子ビームラインで、中性子輸送・集光性能を飛躍的に向上させ、研究を加速する見通しを得た。

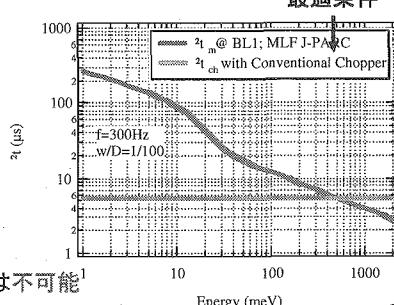
## 中性子スーパーミラーを利用するMAGICチョッパーの提案



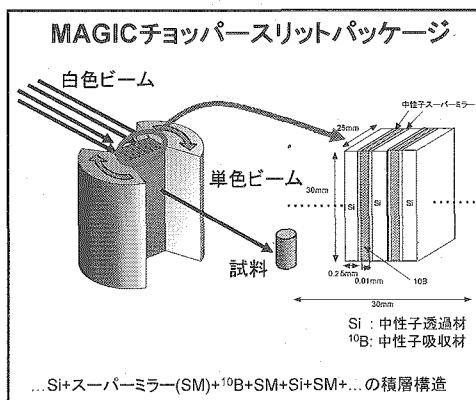
### 問題点

- 通常のチョッパーでは、チョッパーの開口時間  $\Delta t_{ch}$  は常に一定。
- パルス中性子源から発生する中性子では、そのパルス時間幅  $\Delta t_m$  は中性子エネルギーに依存する。
- パルス中性子非弾性散乱測定の最適実験条件:  $\Delta t_{ch} \sim \Delta t_m$

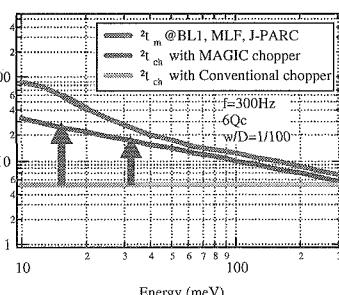
複数の入射エネルギー全てに対して実験条件を最適化することは不可能<sup>1</sup>



## MAGICチョッパーの原理と性能

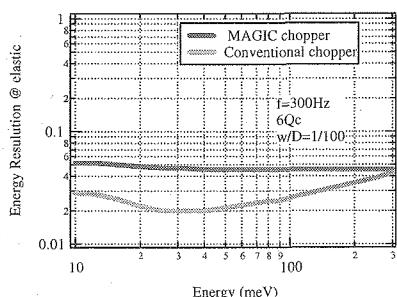


### 広いエネルギー範囲にわたって実験条件が最適化



スーパーミラーの反射により、実効的なチョッパー開口時間が長くなる。  
反射角度は中性子エネルギーに依存する。

### エネルギー分解能が広いエネルギー範囲で一定

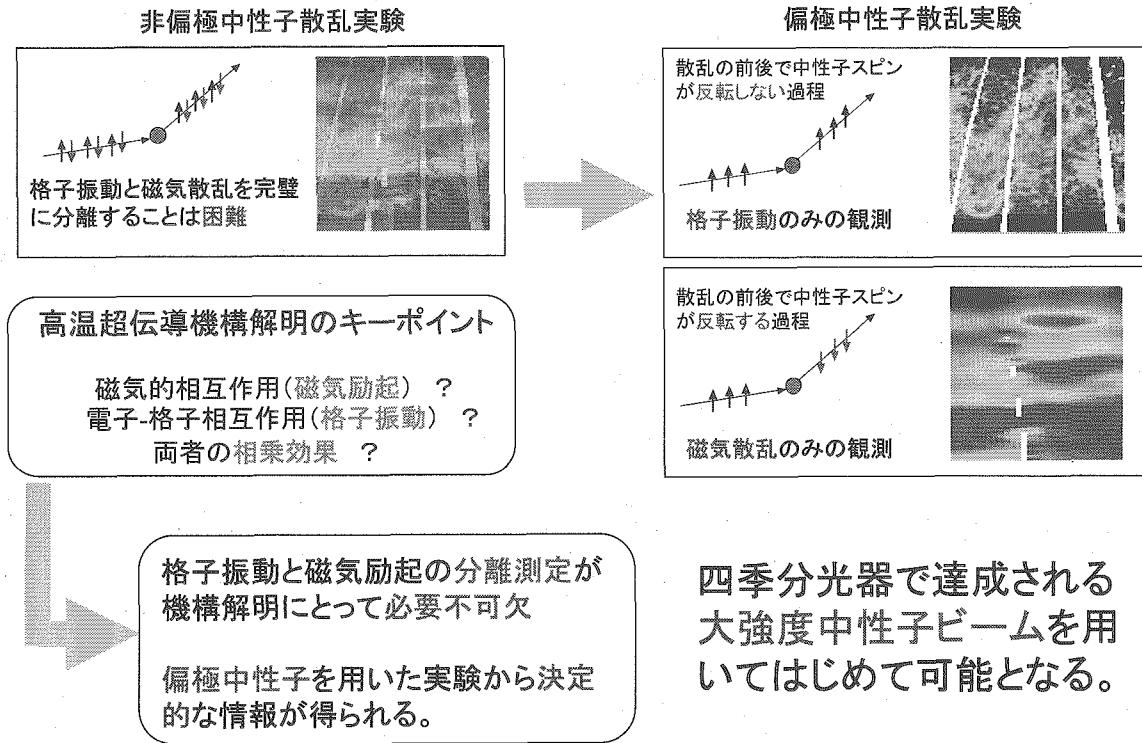


計算上の性能評価はほぼ終了。  
(H18.5.10付け特許出願)

現在、アイデアの実証を行うための試作機の製作を進めており、今後は、試作機のテスト実験を通じて実機に向けた詳細設計に反映させる。

## 偏極中性子がなぜ必要か？

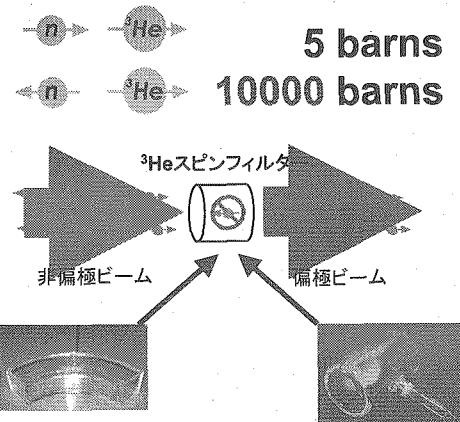
中性子のスピン方向を揃えたビーム（偏極ビーム）を用いることで、格子振動と磁気散乱の分離が可能



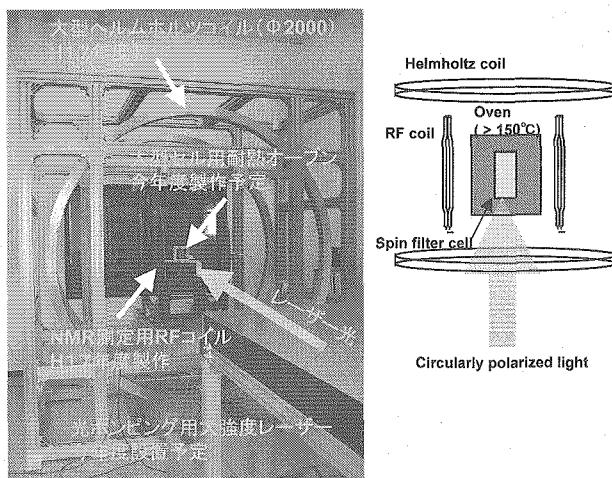
## <sup>3</sup>Heスピニルター開発室の整備状況

<sup>3</sup>Heスピニルターとは：

<sup>3</sup>He原子核における中性子吸収断面積の  
スピニ依存性を利用した偏極デバイス

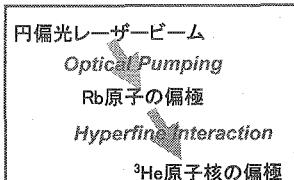


### Spin-Exchange Optical Pumping(SEOP)システム



<sup>3</sup>He原子核スピンを偏極化させてガラスセルに封じる

SEOP(Spin Exchange Optical Pumping)法による偏極化



- 大強度レーザーシステム
- 偏極保持の均一磁場
- 偏極率測定のNMRシステム
- Rb蒸気生成のオープン

偏極率測定のための整備はほぼ終了。

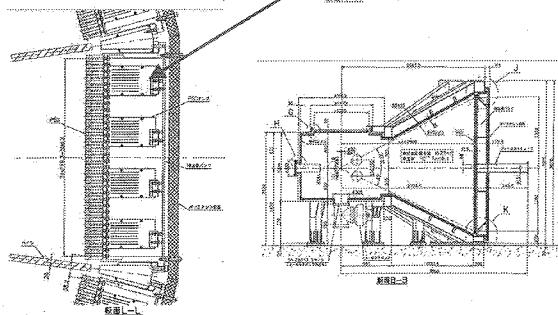
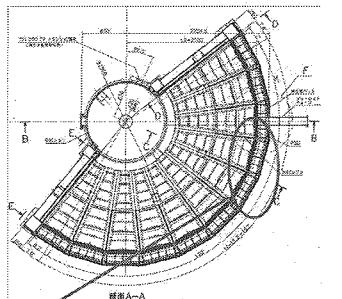
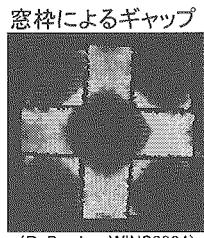
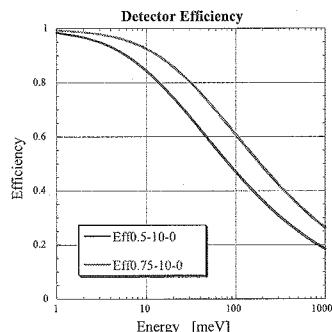
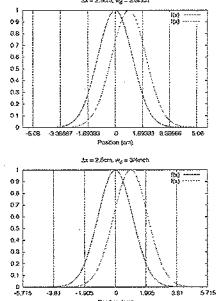
今後、光学機器およびオープン等の設置・  
製作を進め、今年度中に<sup>3</sup>Heスピニルターセルを供給できる体制を整える。

# 四季分光器用 位置敏感検出器

17年度:検出器検討および試験

## ★検出器の基本仕様(大面積18平米)

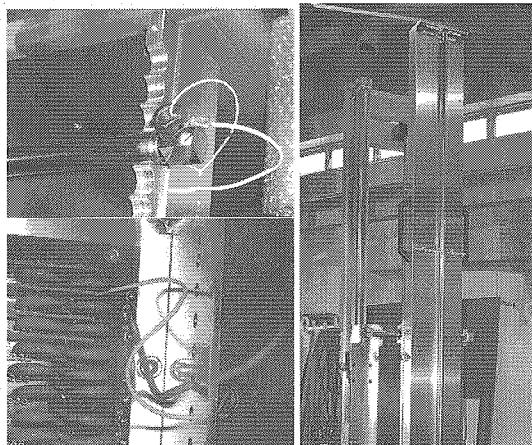
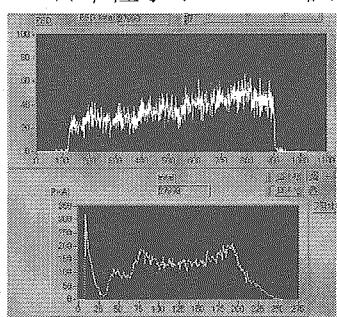
- 1) 2.5m長尺検出器: J-PARCで初  
短い検出器アレイのギャップを最小化する  
→超伝導における特徴的な相関位置を逃さない
- 2) 3/4"径:  
超伝導状態における逆格子空間に広がった素励起  
を十分観測できる
- 3) 真空散乱槽内へ設置:  
真空層隔壁による散乱(バックグラウンド)を低減  
→超伝導の弱い信号を効率よく測定
- 4) 検出効率



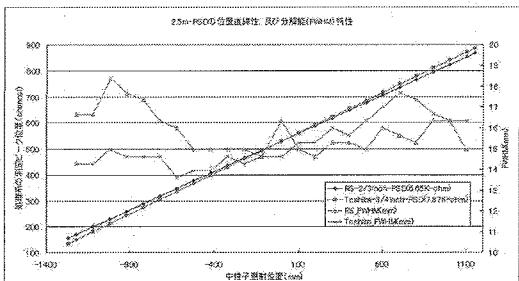
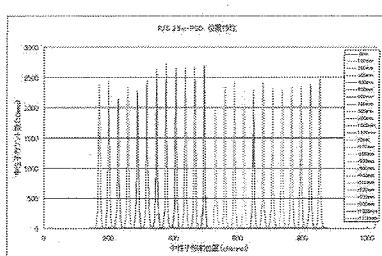
## ★検出器試験(性能確認)

- 1) 2.5m長尺検出器架台・アンプボックスの作成
- 2) 真空カッピングの工夫(今後も継続)
- 3) 読み出し回路と検出器システムの構築

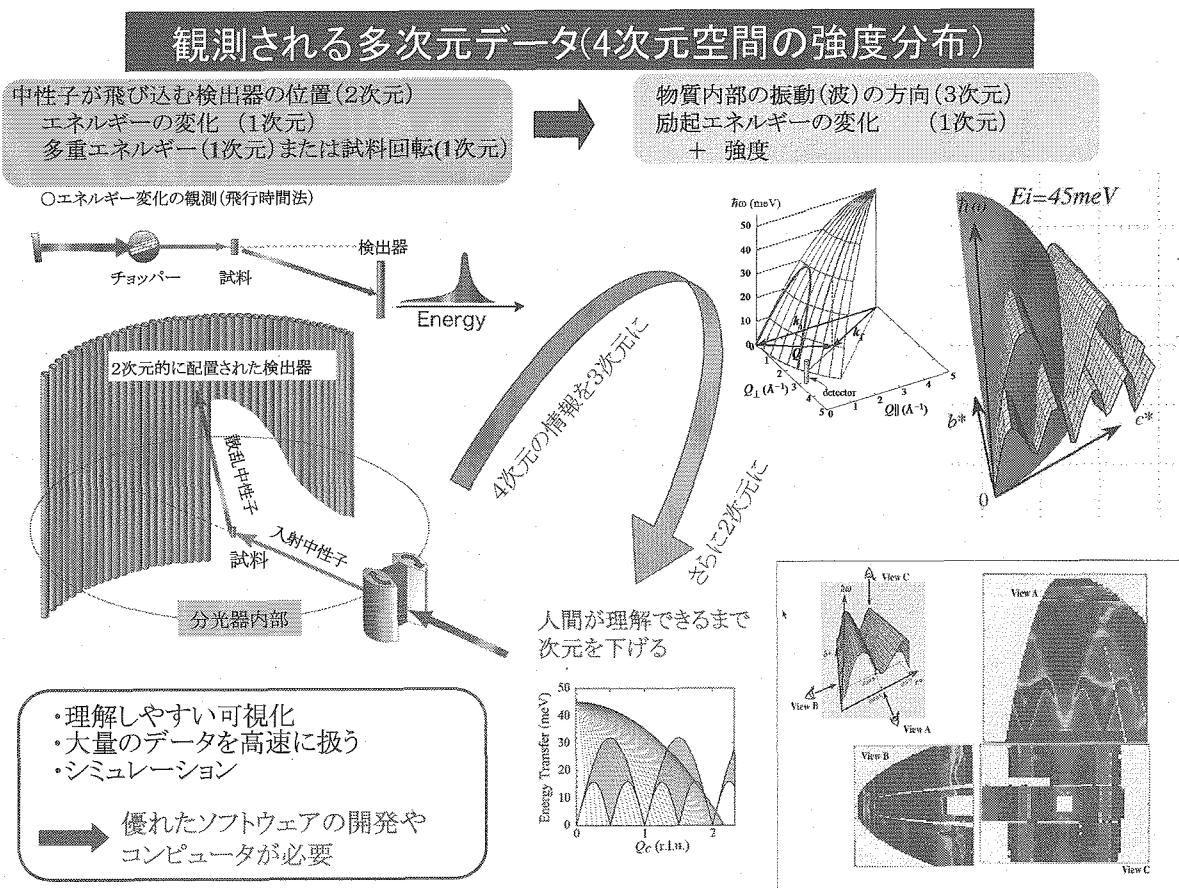
## ★中性子オンビーム試験結果



- 1) 独自開発のアンプ基盤との整合性→OK
- 2) 位置分解能→OK
- 3) 検出器直線性→OK



検出器試験  
モックアップ  
@JRR3



## 特別推進研究研究会「量子ビームによる高温超伝導機構の解明」

開催場所: 茨城県北茨城市五浦観光ホテル別館大観荘

開催日: 2005年11月1日~2日

参加者: 30名

講演数: 口頭発表12件

推進研究の第1回目の研究会

・研究組織のキックオフミーティング

・高温超伝導機構研究の最新の動向を探り、本特別推進研究の方向付けを得る

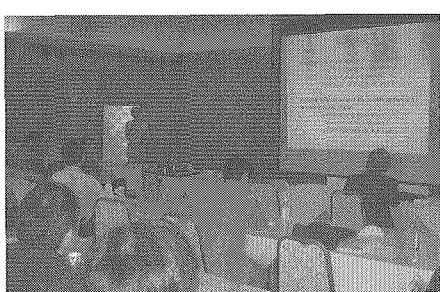
これまで何が解明され、何が未解明か？

四季分光器に求められる性能はどのようなものか？

・関連分野(理論、ARPES、放射光非弾性散乱等)の研究者との連携を図る



開催報告報告: 中性子科学会誌「波紋」(Vol.16, No.1)  
講演概要集: JAEA-Review 2006-006



## 2<sup>nd</sup> Workshop on Inelastic Neutron Spectrometers 2005

開催場所: Rydges Esplanade Resort Cairns, Cairns, Australia

開催日: 2005年12月5日~6日

International Conference on Neutron Scattering 2005のサテライトとして開催

日本原子力研究開発機構、高エネルギー加速器研究機構、オーストラリア原子力科学研究所(ANSTO)共催

参加者: 36名(参加者の主な国籍: 日本、米国、フランス、ドイツ、イギリス、オーストラリア、韓国)

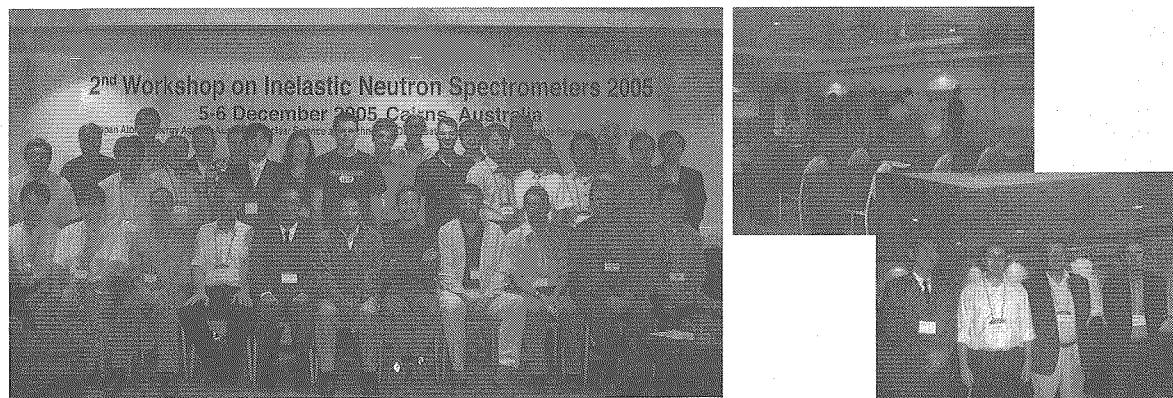
講演数: 口頭発表22件、ポスター発表9件

中性子非弾性散乱実験装置の技術的な側面に特化した国際ワークショップ

四季分光器の開発・設計に関わる最新の技術の情報収集、意見交換と国際協力についての議論の場を得ることを狙う

開催報告報告: 中性子学会誌「波紋」(Vol.16、No.1)、Neutron News(Vol.17、No.3(印刷中))

講演概要集: Journal of Neutron Research別冊(編集中)



### 研究スケジュール

項目	17年度(2005年度) 4 5 6 7 8 9 10 11 12 1 2 3	18年度(2006年度) 4 5 6 7 8 9 10 11 12 1 2 3	19年度(2007年度) 4 5 6 7 8 9 10 11 12 1 2 3	20年度(2008年度) 4 5 6 7 8 9 10 11 12 1 2 3
分光器本体	概念設計 実施設計 SP, TMR購入 実施設計 入札 製作	詳細設計 CP購入 設置		
真空ポンプ 真空散乱槽				受入
中性子ガイド管 シャッター部 ジャケット ミラー 収束デバイス	概念設計 入札 製作 ミラー開発 概念設計、加工装置整備	設置 入札 製作 製作 加工装置整備		陽子炉 J-PARC/MLF
新型チョッパー スリットパッケージ スピンドル	概念設計 試作機製作 開発 入札	試験 実機製作 実機製作 仮置	設置	四季による 研究推進
検出器システム	R&D 試験機構入	試験、アンプ開発 入札	実機製作 設置	調整
偏極デバイス	SEOPステーション整備	試験機製作、偏極試験 入札	実機製作	設置
遮蔽体 ビームライン遮蔽体 本体遮蔽体	遮蔽設計 入札	製作 入札 製作	設置 設置	
データ解析	R&D 入札		製作	
試料作成環境	単結晶育成装置導入 X線单結晶方位育成装置導入		単結晶試料作成 高圧酸素処理炉導入 単結晶試料作成	
研究会	ICNS2005 五浦 WS WINS2005	WINS2006		

## H17年度：基本仕様の決定、装置全体設計、各デバイスの開発開始

- 基本仕様の決定
  - 装置設置検討委員会：2005年7月 一次審査合格、2006年1月 二次審査合格
  - 五浦海岸WS（11月）、WINS2005（12月）にて報告、専門家より意見を招請
- 分光器本体
  - 装置全体設計（神戸製鋼）
  - 散乱真空槽排気用Scrollポンプ、Turboポンプ調達（Leybold）
- 遮蔽体
  - 遮蔽詳細設計（RIST）
- 中性子輸送系
  - ガイド管のデザイン検討
  - シャッター内ガイド管調達（SwissNeutronics）
  - 収束デバイス作成用微小加工装置整備
- 検出器
  - 試験用2.5m  $^3\text{He}$  PSD調達（GE[ $\phi 2/3''$ ] & 東芝[ $\phi 3/4''$  &  $\phi 2/3''$ ])
  - 2.5m  $^3\text{He}$  PSD用試験治具製作（富士サービス）
- チョッパー
  - RRM用新型Fermiチョッパー(MAGICチョッパー)検討
  - HMIと協定準備
  - 特許準備
- 偏極子
  - SEOPステーション整備

## H18年度：詳細仕様の決定、装置製作開始、各デバイス開発継続

- 分光器本体
  - 真空散乱槽詳細設計（神戸製鋼）【すでに、分光器の性能を損なうことなく、大幅なコストダウンに成功】
  - 真空散乱槽製作
- 遮蔽体
  - 新放射線管理基準に基づき、遮蔽再設計（RIST）
  - ビームライン遮蔽体製作
- 中性子輸送系
  - 中性子ガイド管製作
- 検出器
  - 2.5m  $^3\text{He}$  PSD性能試験【すでに、良好な性能をJRR3で確認】
  - 2.5m  $^3\text{He}$  PSD仕様決定（径、ガス圧、コネクタ、アンプ）
- チョッパー
  - RRM用新型Fermiチョッパー(MAGICチョッパー)試作器製作
- 偏極子
  - SEOPステーション整備
- データ解析
  - データ解析ソフトウェア開発開始

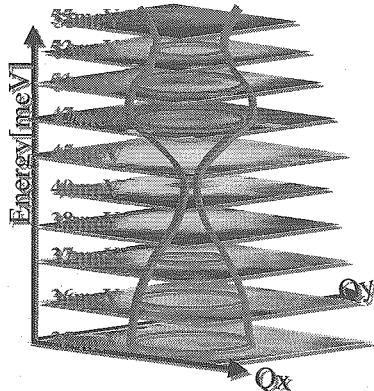
## 高温超伝導体における 奇妙な磁気励起とフォノン異常

### ★YBCO最適ドープ組成の磁気励起

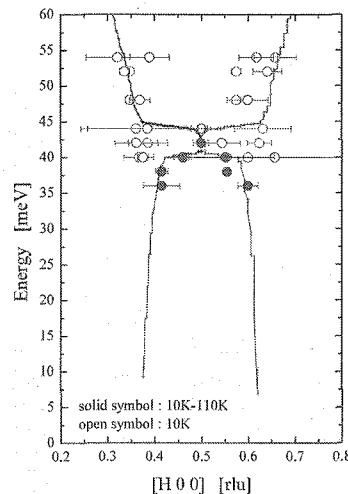
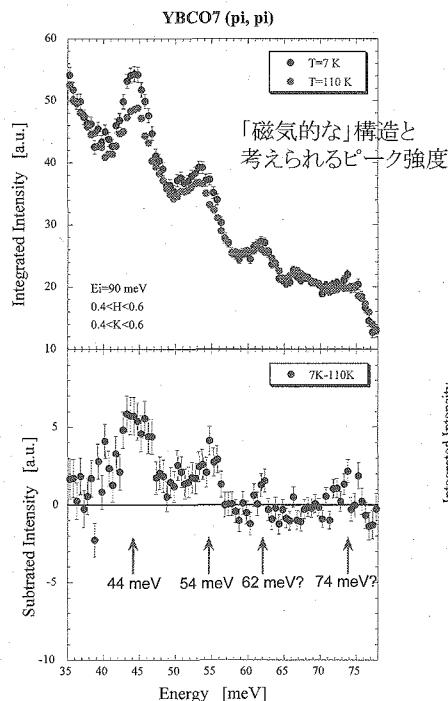
- ・非整合ピークの強度が減少
- ・強い共鳴ピーク

最も超伝導状態を反映しているにもかかわらず、弱いシグナルのためその全体像を観測することが困難

ISIS-MAPS分光器で捉えられた $Q=(\pi, \pi)$ 近傍の動的構造



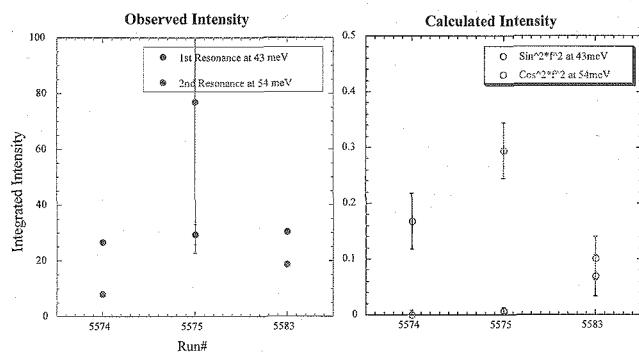
### $Q=(\pi, \pi)$ におけるエネルギースペクトル



各エネルギーにおけるピーク位置から求められた分散。白丸はフォノンの成分を含んでいる。実線はFermi面のネスティングから計算されたスピントラクトル構造

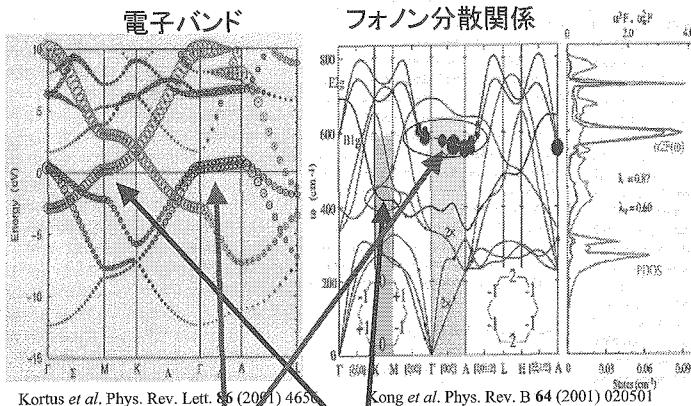
### C軸とエネルギーの相関によるピーク強度のModulation

Run# 5574 :  $E_i=80$  meV  
Run# 5575 :  $E_i=110$  meV  
Run# 5583 :  $E_i=90$  meV



44meVと54meVの共鳴ピークはそれぞれ、  
44meV : アコースティックマグノン  
54meV : オプティカルマグノン  
の特徴を有している

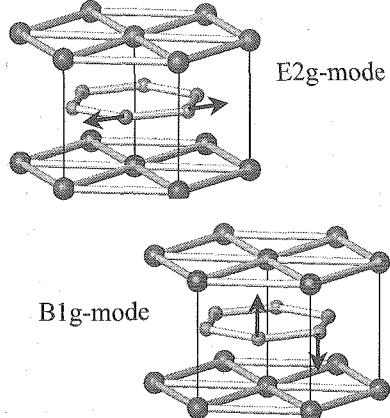
## ★YBCO&amp;LSCOにおけるフォノン異常

電子-格子相互作用の重要性:(Mg<sub>1-x</sub>Al<sub>x</sub>)B2

E2g- $\sigma$   
 $\Gamma$ -A  
 $\sigma$ -gap

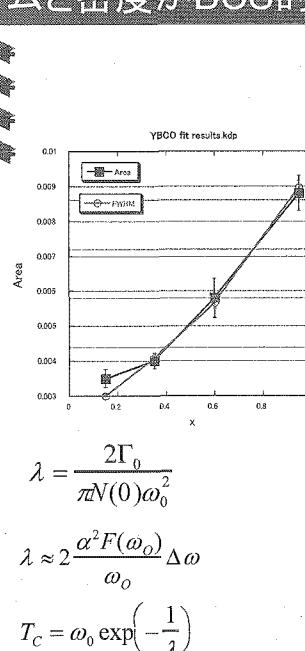
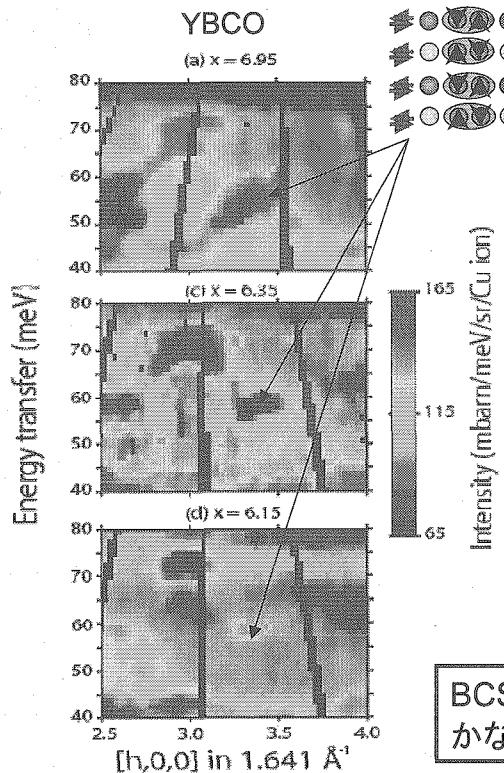
B1g- $\pi$   
K-M  
 $\pi$ -gap

超伝導転移点近傍におけるE2g-mode、B1g-modeの変化  
→強い電子-格子相互作用の存在  
→超伝導転移に関与  
→MgB2の2ギャップの説明

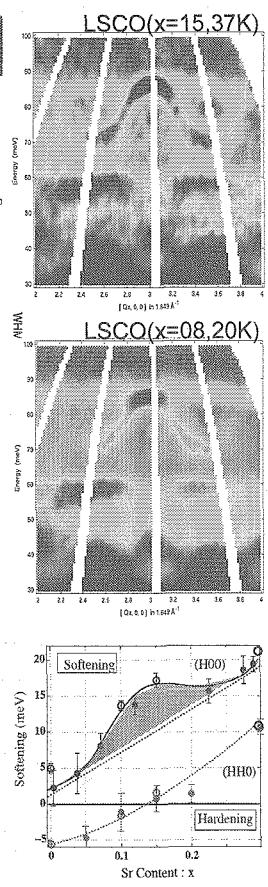
MgB2で超伝導発現に寄与すると  
考えられている振動モード

BCSの壁を超える様な高い転移点 → 高温超伝導におけるフォノンメカニズムの再考

## 酸素の伸張運動ライフタイムと密度がBCS的



BCSによる整理で  
かなりあうように見える。



# 中性子散乱から見た高温超伝導基礎研究 の現状と金研グループの活動状況

山田 和芳 (東北大学 金研)

## 内容

- 1) 序論 (世界の動向と現状)
- 2) 我々の最近の成果
- 3) 今後の展開

## 特別推進における金研グループの果たすべき役割

### 「四季」完成以前

- 1) 既存の設備を用いた中性子散乱研究の推進
- 2) 「四季」で行なうべき研究および問題点の絞り込み
- 3) 「四季」用単結晶試料の準備

### 「四季」， J-PARC完成後

- 1) 「四季」を利用した銅酸化物超伝導体の研究
- 2) 理論や他の相補的手段を含めた包括的研究体制の構築

1986

## 銅酸化物高温超伝導の発見

銅酸化物超伝導体の異常物性（第1期）

磁性と超伝導の絡み合いの研究

銅酸化物超伝導体の普遍的性質は何か？（第2期）

2006

電荷、スピン、格子の一体的運動

超伝導発現と普遍的性質との関連は何か？（第3期）

### 第2期 銅酸化物超伝導体の普遍的性質は何か？

さまざまな銅酸化物超伝導体についての研究

(a) 異なる種類の超伝導体

- i) La系, Y系以外の超伝導体
- ii) 電子ドープ型超伝導体

(b) 広範囲な電荷ドープ量についての系統的研究

絶縁体から通常金属まで

（超伝導はどのように現れて、どのように消えるのか？）

## 世界の現状（高温超伝導の中性子関連）

自前の単結晶試料による研究（日本から結晶育成技術が輸出）



Hg系大型単結晶

M. Greven (USA)

Bi系(Bi2212)大型単結晶

J. M. Tranquada (USA)

電子ドープ系大型単結晶

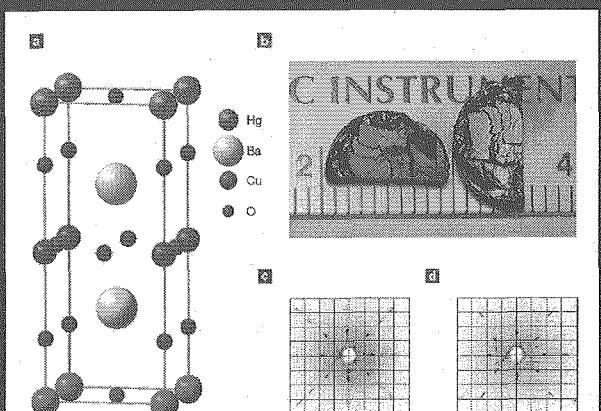
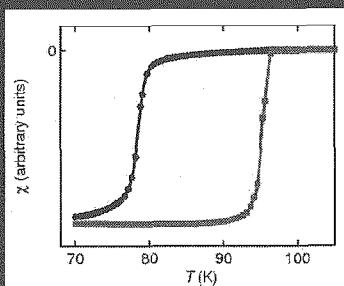
P. Dai (USA)

Y系単一ドメイン単結晶

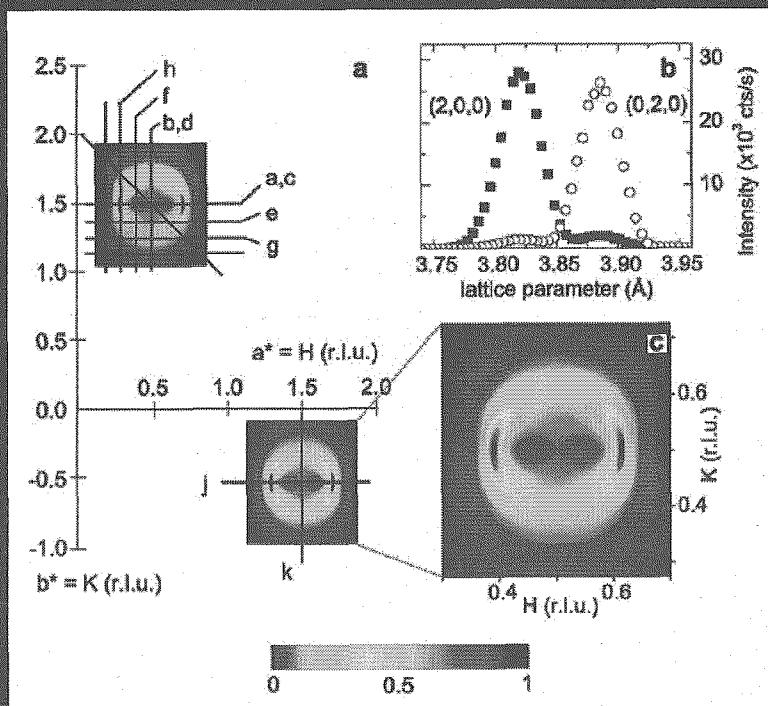
B. Keimer (Germany)

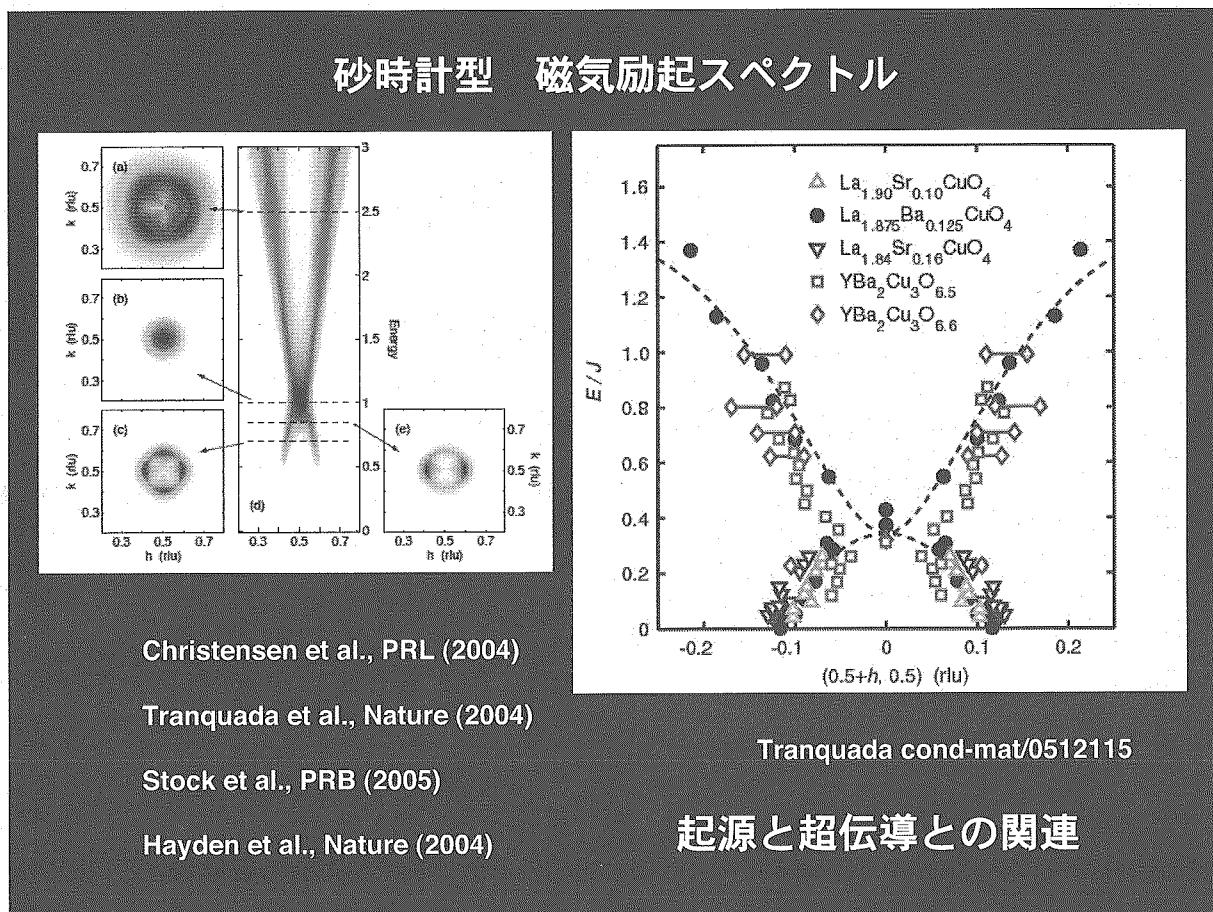
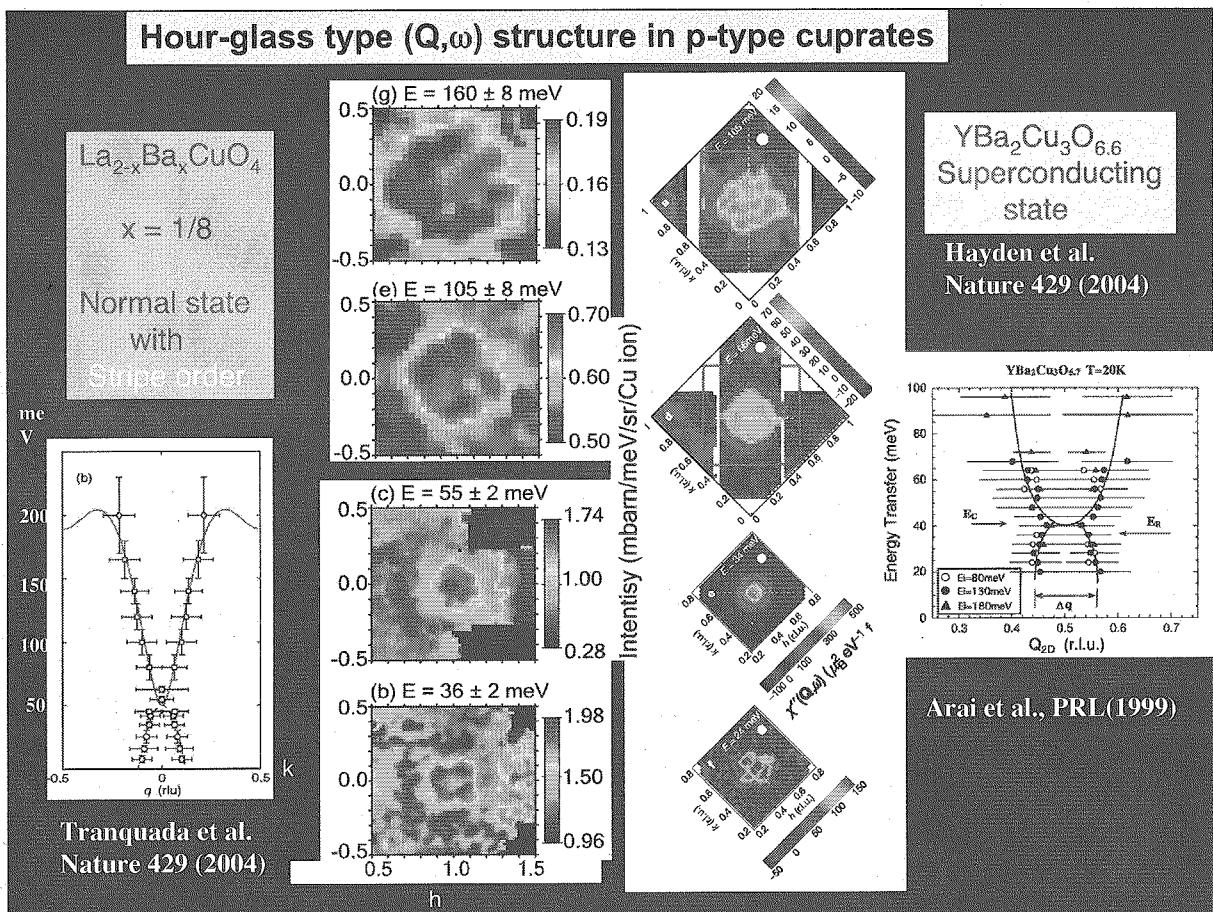
La系大型単結晶

S.M. Hayden (UK)



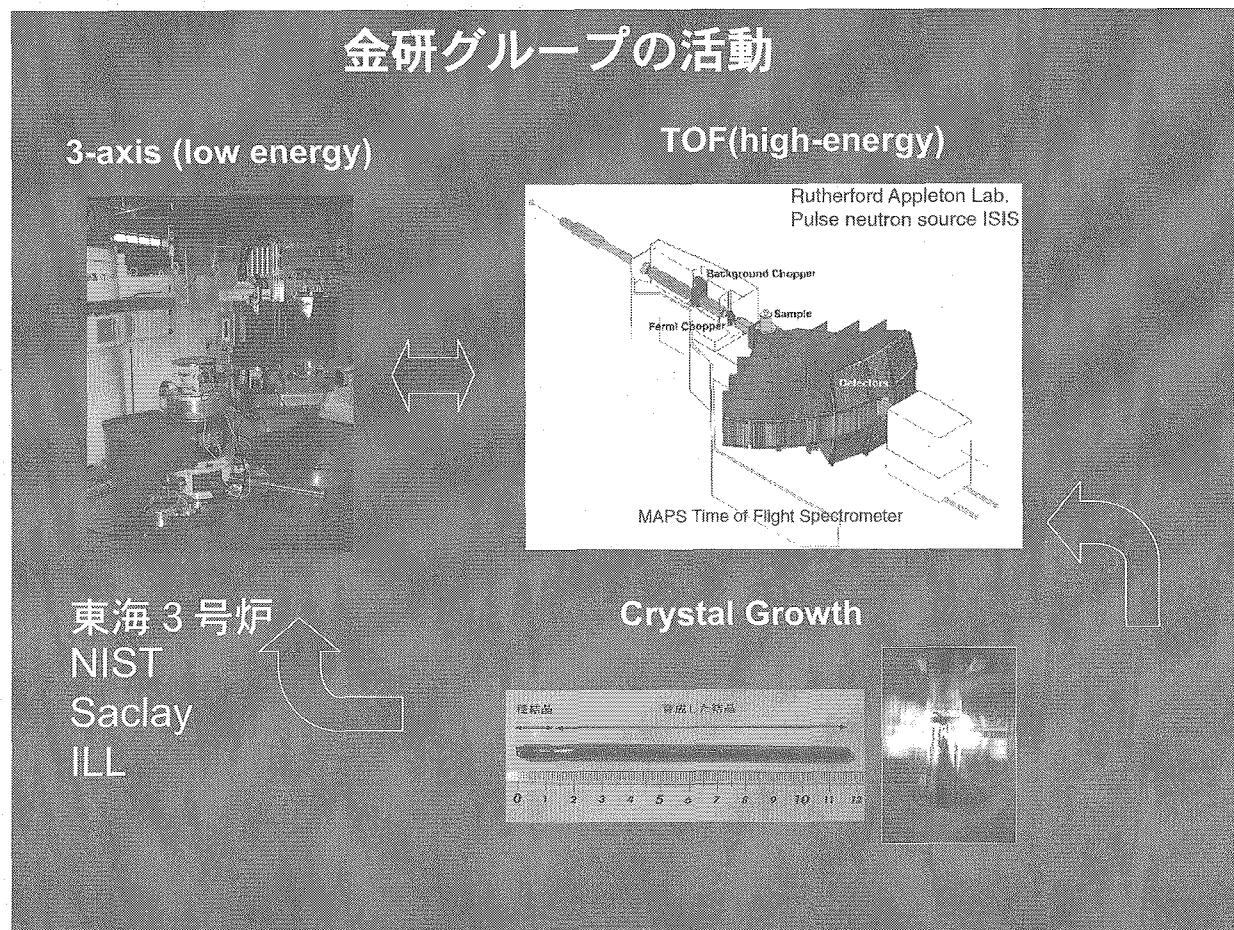
Y系単一ドメイン単結晶 B. Keimer (Germany)

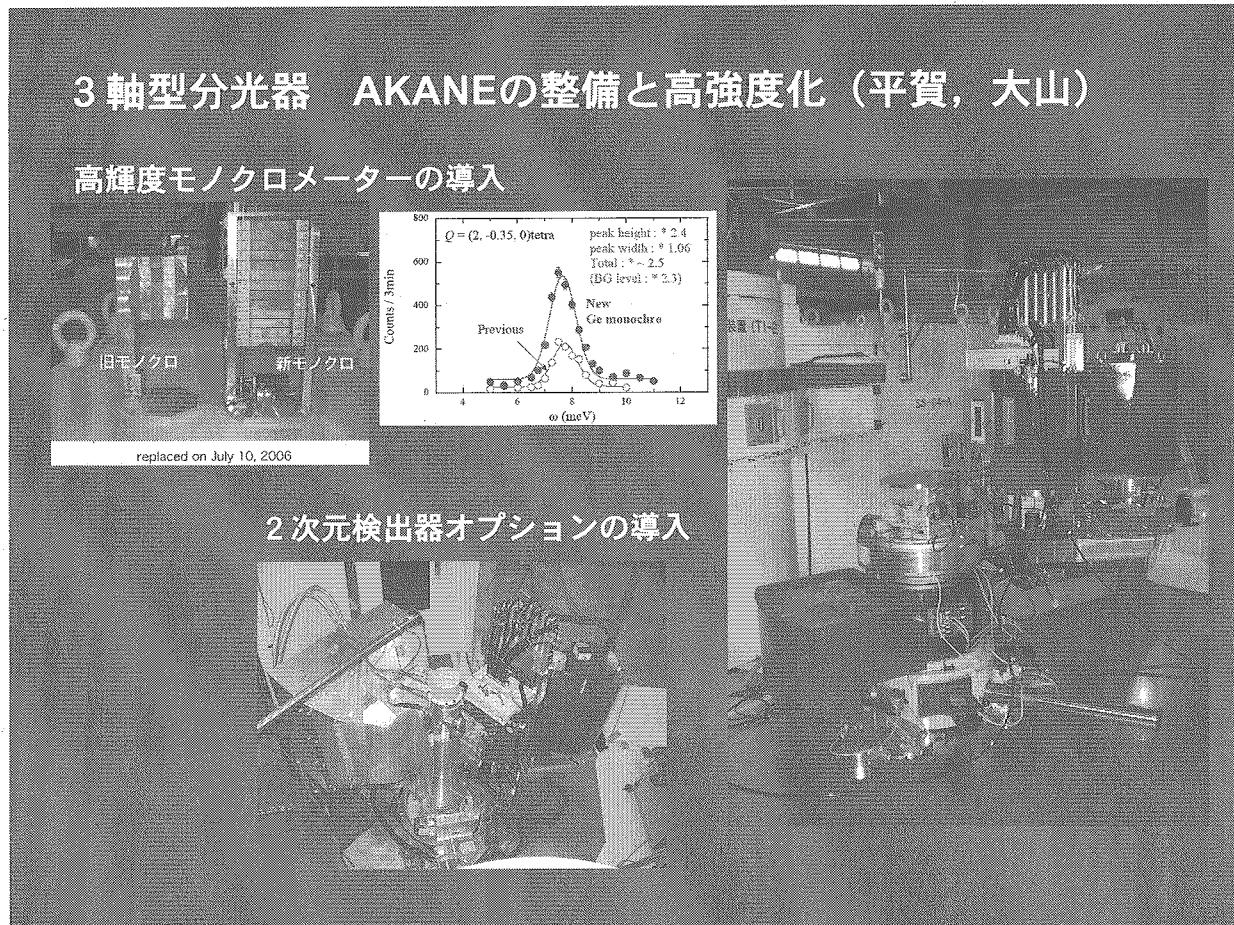




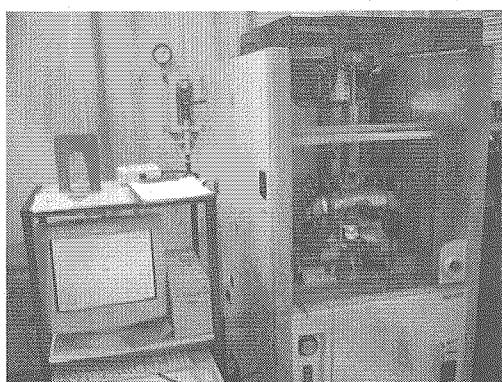
## 金研グループの活動

### 3足のわらじを履いた研究

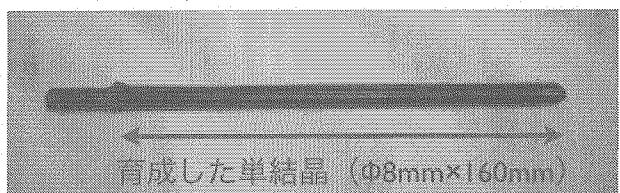
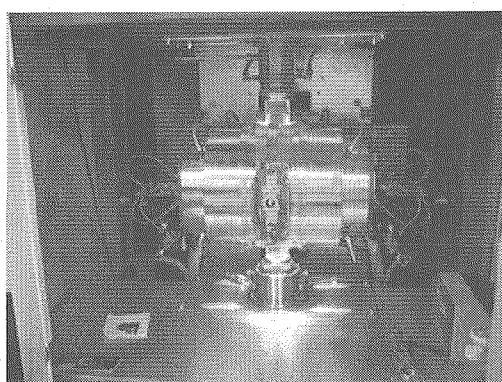
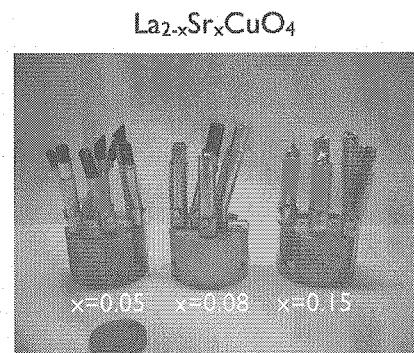




### 結晶育成装置（藤田）



過去10年間に120本以上の単結晶を育成



育成した単結晶（Ø8mm×160mm）

## 作成した結晶のリスト (2006年上半期)

## ホールドープ系

(藤田)

試料組成	体積
$\text{La}_{1.90}\text{Sr}_{0.10}\text{Cu}_{0.99}\text{Mn}_{0.01}\text{O}_4$	4cc
$\text{La}_{1.90}\text{Sr}_{0.10}\text{Cu}_{0.98}\text{Mn}_{0.02}\text{O}_4$	6cc
$\text{La}_{1.85}\text{Sr}_{0.125}\text{Cu}_{0.995}\text{Fe}_{0.005}\text{O}_4$	7cc
$\text{La}_{1.87}\text{Sr}_{0.13}\text{Cu}_{0.99}\text{Fe}_{0.01}\text{O}_4$	6cc
$\text{La}_{1.86}\text{Sr}_{0.14}\text{Cu}_{0.98}\text{Fe}_{0.02}\text{O}_4$	7cc
$\text{La}_{1.86}\text{Sr}_{0.16}\text{Cu}_{0.98}\text{Fe}_{0.02}\text{O}_4$	4cc
$\text{La}_{1.82}\text{Sr}_{0.18}\text{Cu}_{0.98}\text{Zn}_{0.02}\text{O}_4$	4cc
$\text{La}_{1.75}\text{Sr}_{0.25}\text{Cu}_{0.96}\text{Zn}_{0.02}\text{O}_4$	5cc
$\text{La}_{1.28}\text{Pr}_{0.6}\text{Sr}_{0.12}\text{CuO}_4$	3cc
$\text{La}_{1.70}\text{Sr}_{0.24}\text{Ce}_{0.08}\text{CuO}_4$	9cc
$\text{La}_{1.64}\text{Sr}_{0.24}\text{Ce}_{0.12}\text{CuO}_4$	3cc

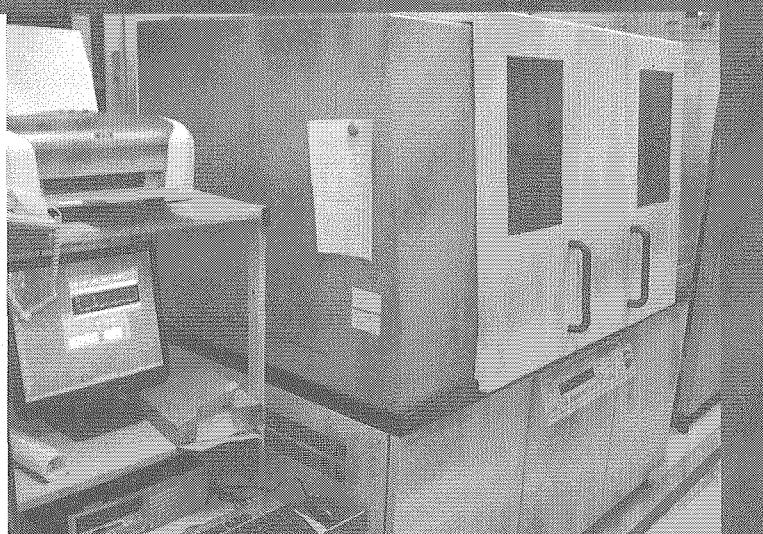
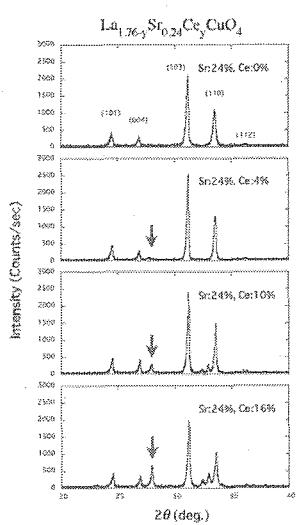
合計~60cc

## 電子ドープ系

試料組成	体積
$\text{Nd}_{1.85}\text{Ce}_{0.15}\text{Cu}_{0.99}\text{Zn}_{0.01}\text{O}_4$	2.5cc
$\text{Nd}_{1.85}\text{Ce}_{0.15}\text{Cu}_{0.98}\text{Zn}_{0.02}\text{O}_4$	2cc
$\text{Nd}_{1.85}\text{Ce}_{0.15}\text{Cu}_{0.99}\text{Ni}_{0.01}\text{O}_4$	2.5cc
$\text{Nd}_{1.85}\text{Ce}_{0.15}\text{Cu}_{0.98}\text{Ni}_{0.02}\text{O}_4$	2.5cc
$\text{Pr}_{0.92}\text{LaCe}_{0.08}\text{CuO}_4$	1cc
$\text{Pr}_{0.92}\text{LaCe}_{0.18}\text{CuO}_4$	1cc

合計~12cc

## X線回折装置



## 単結晶試料の評価、アッセンブル

## Laser FZ furnace

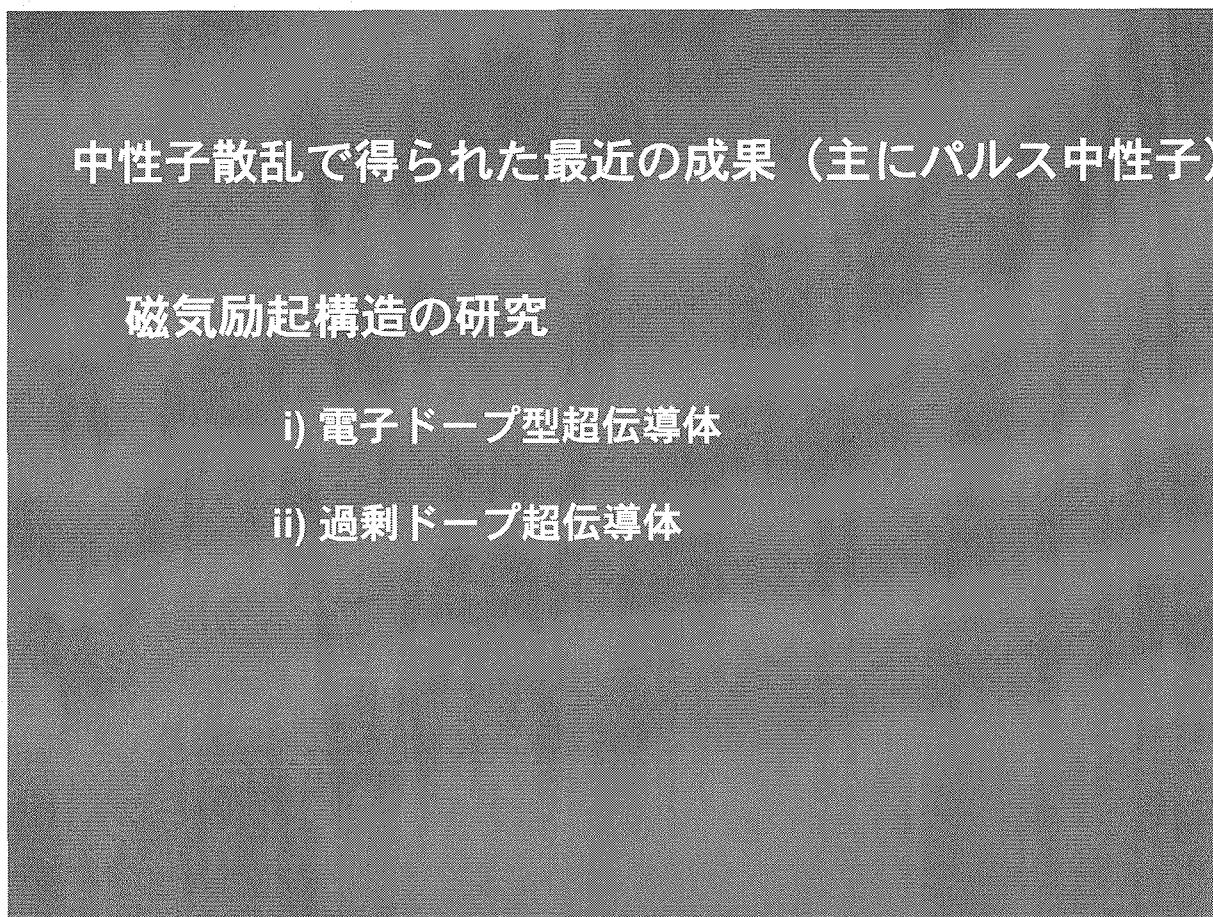
東京大学 岸尾研究室提供

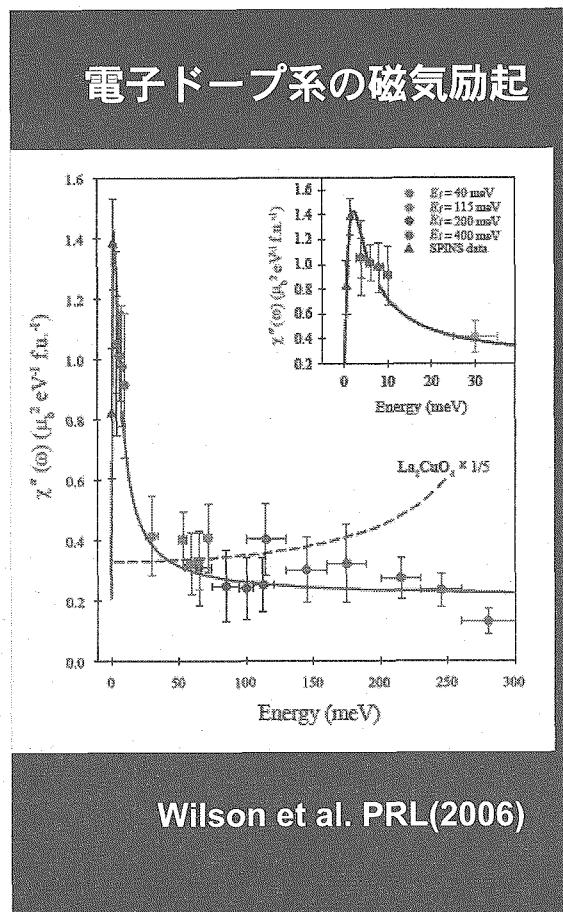
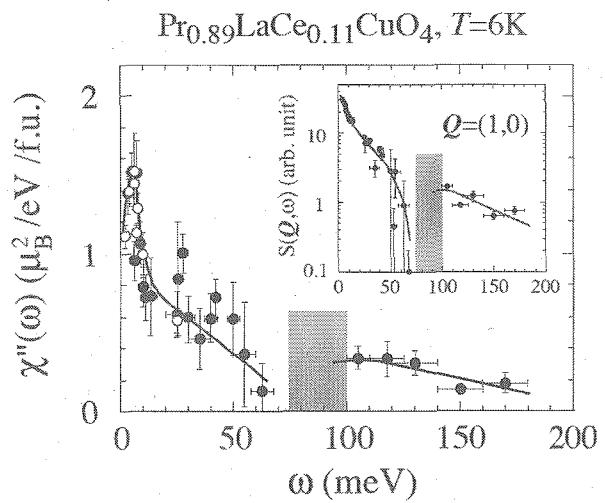
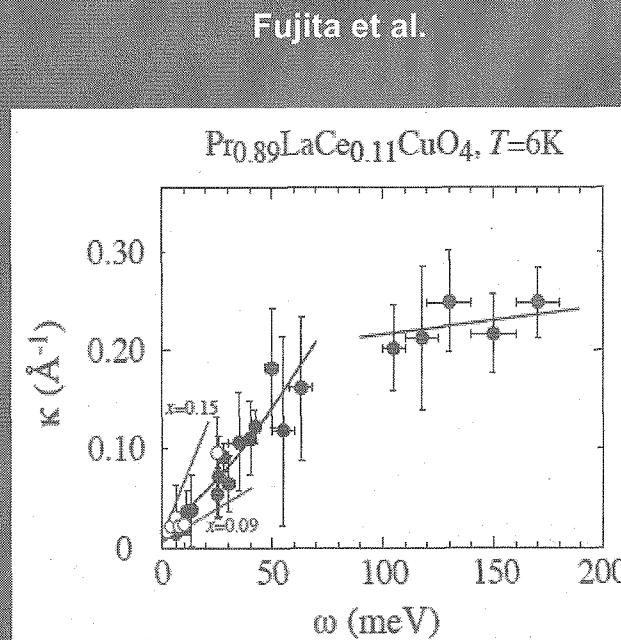
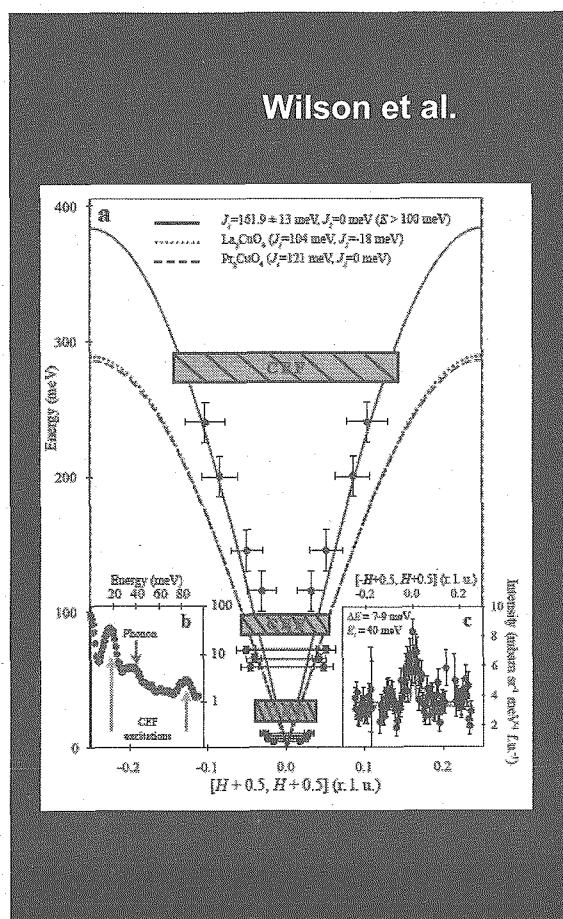
Feed Rod (6 mm $\phi$ )  
Molten Zone  
Quartz Tube  
Collection Mirror (Outside Diameter) 115 mm  
Seed Rod  
Reflection Mirror  
Superconducting Magnet  
Prism  
YAG Laser Beam  
Ring-shaped Laser  
© Hongo

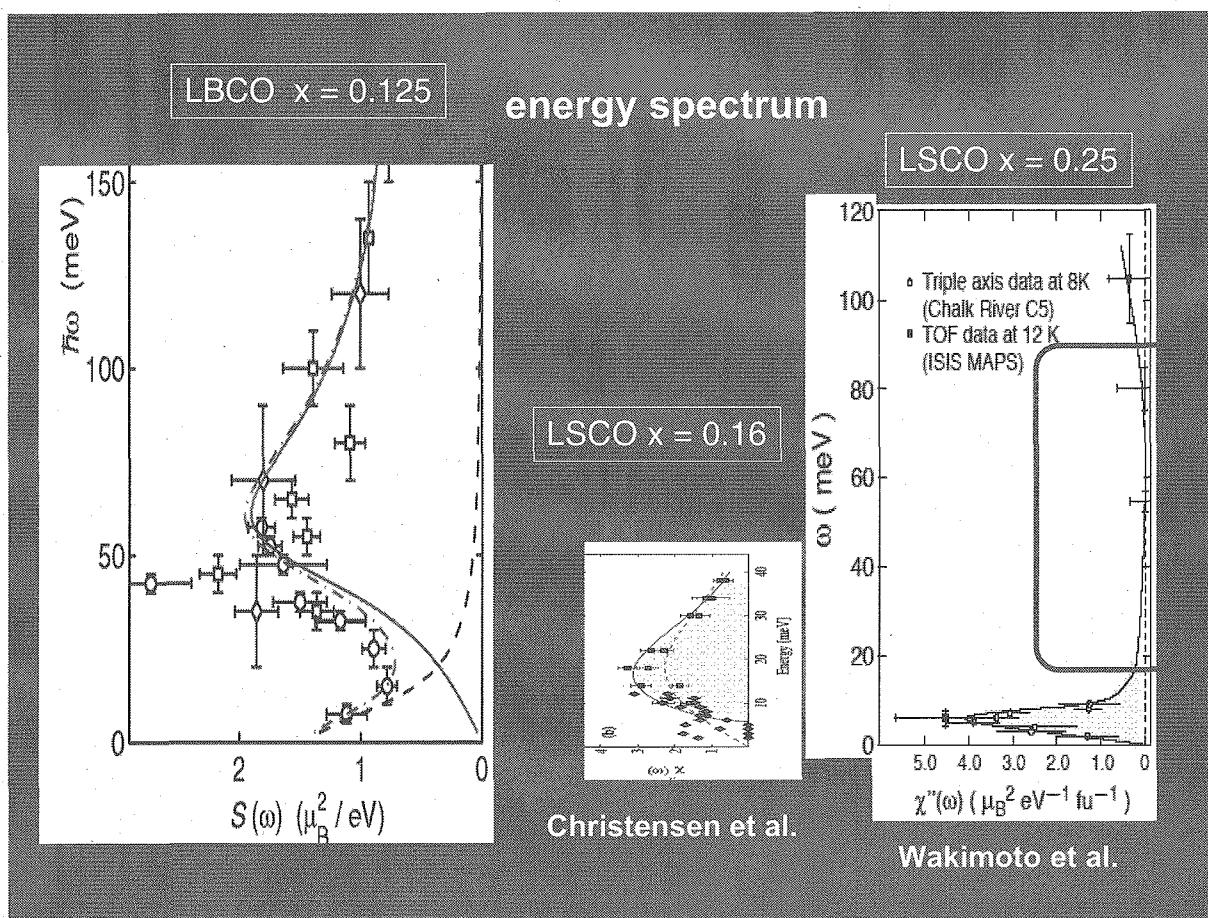
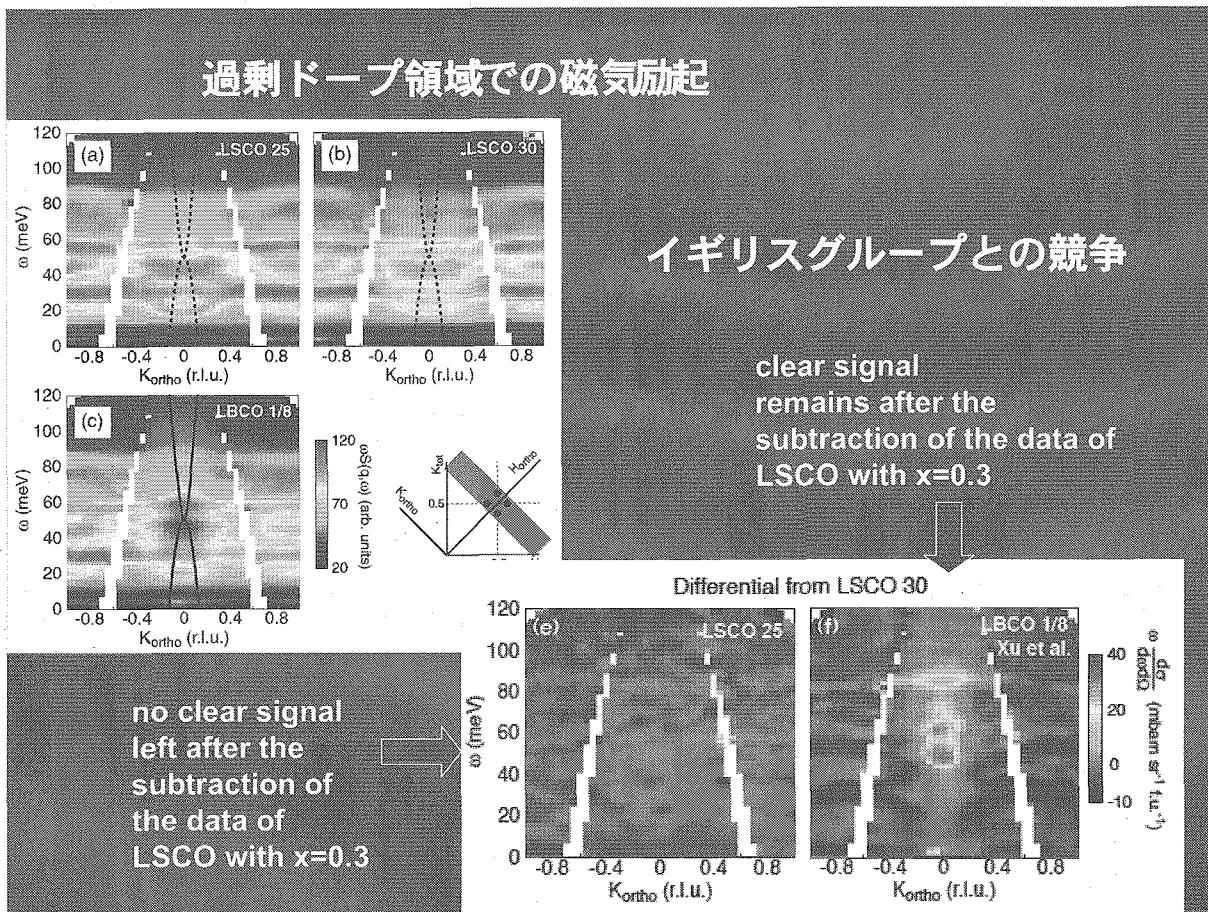
A new FZ furnace with laser heating system (Nd-YAG) is developed.

Canon machinery ltd. and U-Tokyo (2003)

非常に急峻な温度勾配



**オークリッジグループとの競争****M. Fujita et al., JPSJ (2006) accepted**



## 今後の研究展開

銅酸化物超伝導体の普遍的性質は何か？（第2期）

2006

電荷、スピン、格子の一体的運動

超伝導発現と普遍的性質との関連は何か？（第3期）

その解明に向けての研究は？

ISSN 0021-3640, JETP Letters, 2006, Vol. 83, No. 9, pp. 394–398. © Pleiades Publishing, Inc., 2006.  
Original Russian Text © E.I. Shneyder, S.G. Ovchinnikov, 2006, published in Pis'ma v Zhurnal Èksperimental'noi Teoreticheskoi Fiziki, 2006, Vol. 83, No. 9, pp. 462–466.

### Phonon and Magnetic Pairing Mechanisms in High-Temperature Superconductors in the Strong Correlation Limit

E. I. Shneyder and S. G. Ovchinnikov

Kirenskii Institute of Physics, Siberian Division, Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk, 660036 Russia  
Krasnoyarsk State University, Krasnoyarsk, 660062 Russia

e-mail: shneyder@iph.krasn.ru

Received March 16, 2006

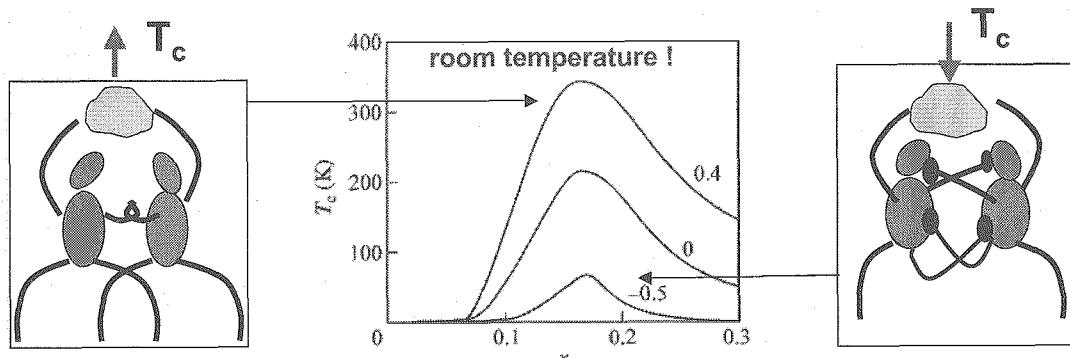
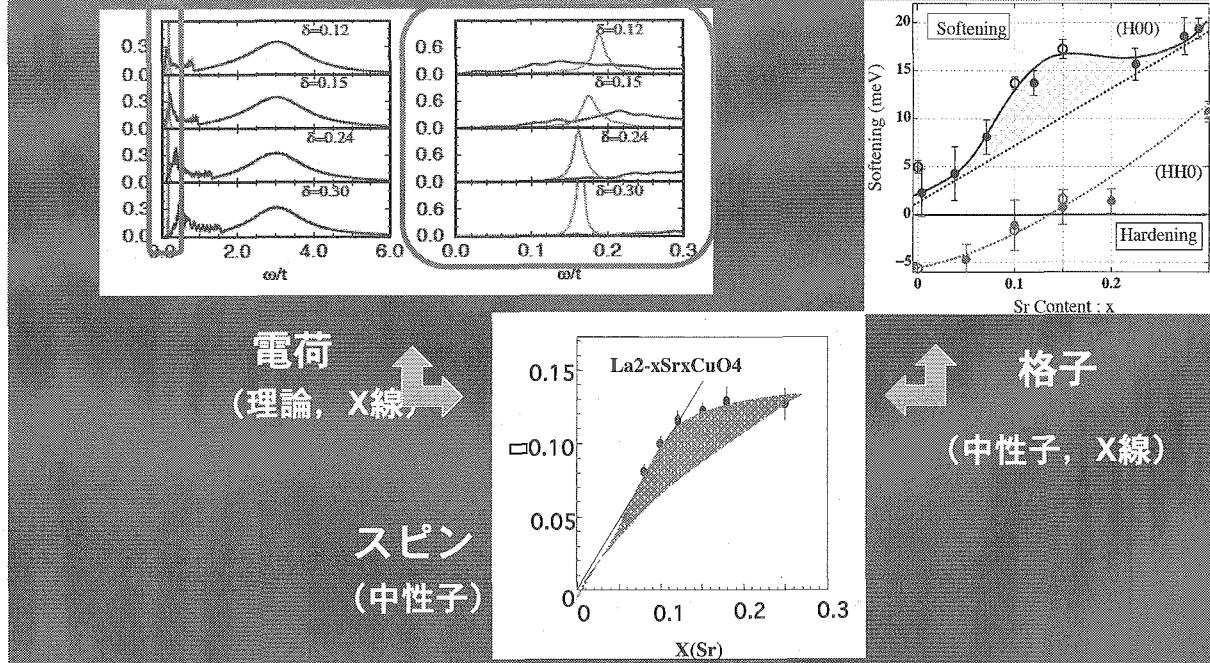


Fig. 3. Concentration dependence of the superconducting transition temperature for the effective EPI parameters  $G/J$  indicated near the curves.

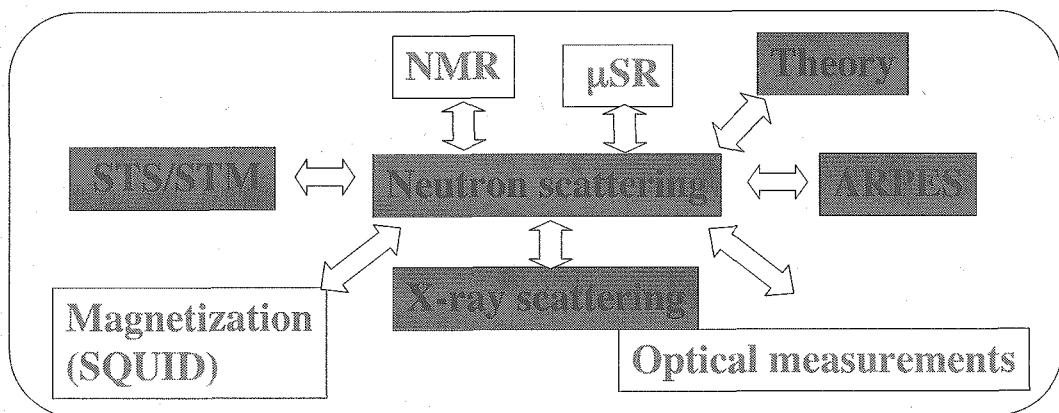
## 超伝導発現と普遍的性質との関連は何か？（第3期）

その解明に向けての実験的研究は？

電荷、スピン、格子の一体的運動の解明



Neutron scattering builds bridges between different probes or theories



Neutron scattering  $\longleftrightarrow$  ARPES  
 $\chi''(Q,\omega)$  (2体相関のQと $\omega$ )  $\longleftrightarrow$   $N(Q,\omega)$  (1電子励起のQと $\omega$ )

広い(Q, $\omega$ )空間での情報が重要

# 銅酸化物高温超伝導体 の単結晶育成

～“四季”を用いた中性子非弾性散乱実験へ向けて～

中性子物質科学研究ユニット  
ナノ材料創製研究グループ

社本 真一 → 単結晶育成と中性子散乱実験(30%)

今井 良宗 → 単結晶育成と酸化物超伝導体の創製

朝岡 秀人 → 単結晶育成およびツインフリー化(20%)

樹神 克明 → 単結晶評価(10%)

Introduction: 銅酸化物超伝導体の中で、どの単結晶を育成するか？

## ホール系

$\text{CuO}_2$ 層1枚 頂点酸素2個  $(\text{La}, \text{Nd})_{2-x}(\text{Ba}, \text{Sr})_x\text{CuO}_4$

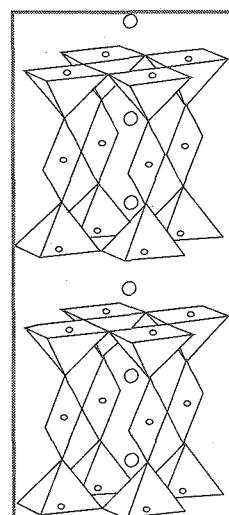
$(\text{Bi}, \text{Tl}, \text{Hg})_{(1,2)}(\text{Ba}, \text{Sr})_2\text{CuO}_4$

頂点酸素1個  $\text{Nd}_{2-x-y}\text{Ce}_x\text{Sr}_y\text{CuO}_4$

$\text{CuO}_2$ 層2枚  $\text{Re}_{1+x}\text{Ba}_{2-x}\text{Cu}_3\text{O}_{6+y}$  ( $\text{Re}=\text{La}, \text{Y}, \text{Lu}$ )

$(\text{Bi}, \text{Tl}, \text{Hg}, \text{Pb})_{(1,2)}(\text{Ba}, \text{Sr})_2\text{CaCu}_2\text{O}_6$

$\text{CuO}_2$ 層3枚  $(\text{Bi}, \text{Tl})_{(1,2)}(\text{Ba}, \text{Sr})_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_8$



## 電子系

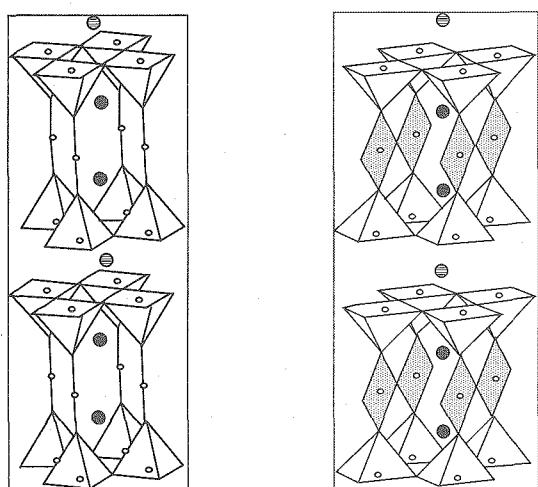
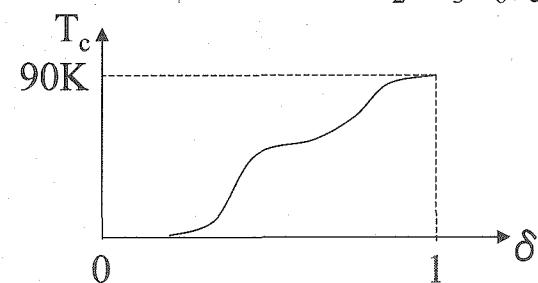
$\text{CuO}_2$ 層1枚  $(\text{La}, \text{Pr}, \text{Nd})_{2-x}\text{Ce}_x\text{CuO}_4$

$\text{CuO}_2$ 層∞枚  $(\text{Sr}, \text{Nd})\text{CuO}_2$

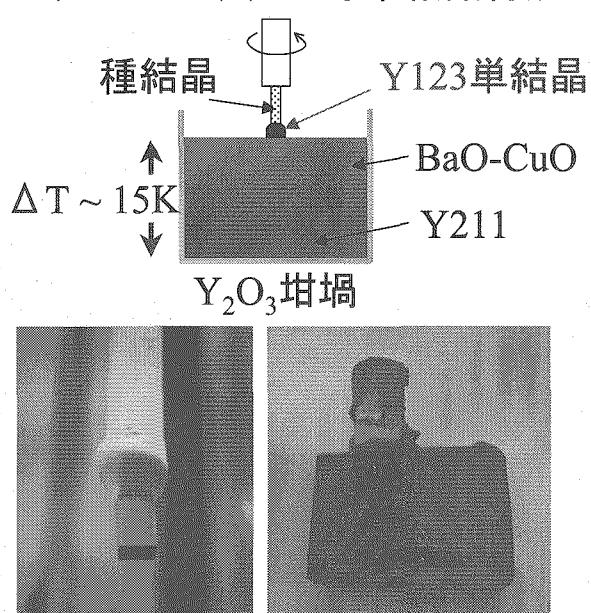
大型・良質  
単結晶の育成

## 梯子系

$\text{Sr}_{14-x}\text{Ca}_x\text{Cu}_{24}\text{O}_{41}$

Introduction:  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+\delta}$  の単結晶育成 $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6+\delta}$  (Y123,  $0 \leq \delta \leq 1$ )

トップシード法による単結晶育成

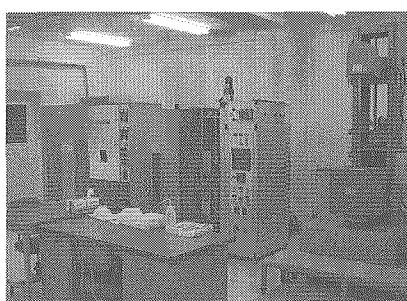


大阪大学田島研究室

 $\sim 1\text{cm}^3$ の単結晶育成が可能

## 現状: Co60照射室の改装 → Future planning: 恒温室化

Co60照射室の単結晶育成準備室としての整備完了

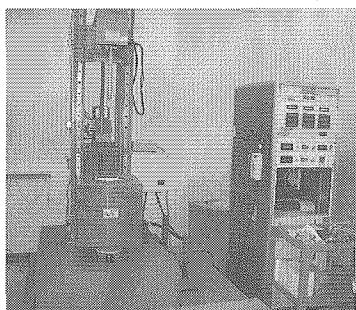
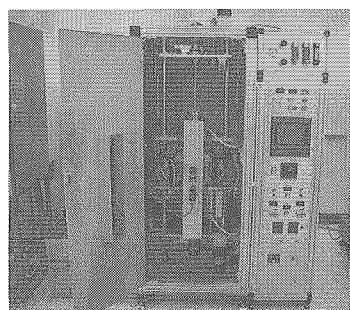
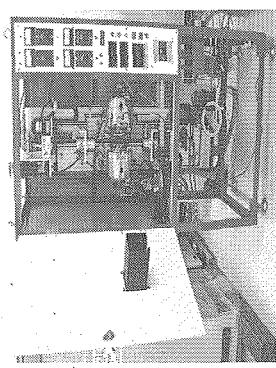


- 3つの装置を使って、単結晶育成が可能
- 秤量から育成まで全て同室で行うことが可能

今後は…

融液の温度変化の外部要因をなくす

→ 恒温室化(配電盤&amp;エアコンの整備)



2橋円FZ炉

CZ炉

現状:  $\text{NdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  種結晶育成  $\rightarrow \text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  大型単結晶育成

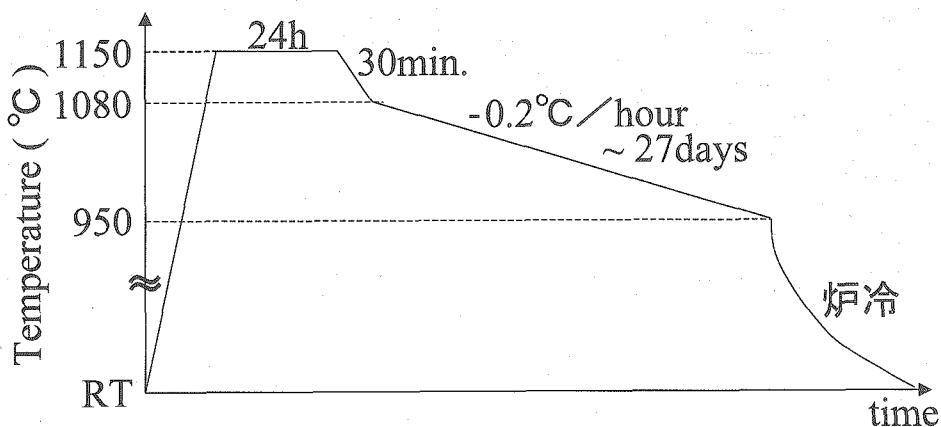
CZ炉を用いたY123単結晶の育成  $\rightarrow$  種結晶( $\text{NdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$ )が必要

融点: Y123 < Nd123

フラックス法を用いた $\text{NdBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{7-\delta}$  単結晶育成

$\triangleright \text{Nd}_2\text{O}_3 : \text{BaO}_2 : \text{CuO} : \text{Cu}_2\text{O} = 7.50\text{g} : 110.27\text{g} : 43.28\text{g} : 38.93\text{g}$

$\triangleright \text{Y}_2\text{O}_3$  坩堝



国际单位系 (SI)

表 1. SI 基本单位

基本量	SI 基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
力	ニュートン	N
物質の量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI 基本単位			記号
	名称			
面体速度	積立度	平均法	メートル	$m^2$
さ，速	度	メートル	メートル	$m^3$
加速度	度	一秒	一秒	$m/s$
波数	度	一秒	一秒	$m/s^2$
密度(質量密度)	度	一トール	一トール	$m^{-1}$
質量体積(比重)	度	キログラム	キログラム	$kg/m^3$
電流	度	立法メートル	立法メートル	$m^3/s$
電界の強さ	度	アンペア	アンペア	$A/m^2$
(物質量)濃度	度	モル	モル	$A/m$
揮屈	率	カンドラ	カンドラ	$mol/m^3$
折率	(数)の1	モル	モル	$cd/m^2$

表3. 固有の名称とその独自の記号で表されるSI組立単位

組立量	名称	記号	SI 組立単位	
			他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面立體周波圧力エネルギー、仕事、熱量電荷、電気量電位差(電圧)、起電力静電容量抵抗コンダクタンス磁磁イントラクタンス光(放射性核種の)放射能吸収線量、質量エネルギー一分与、カーマ線量当量、周辺線量当量、方向性線量当量、個人線量当量、組織線量当量	角ステラジアン(a)ルニュートンルワットスカルルトントンボルアラムスジメンスラバランスリス度(4)ケルビンセリクルベックレルラムスルグレイシーベルト	rad sr(c) N Pa J W C V F A/V V s Wb/m <sup>2</sup> Wb/A K cd · sr(c) 1m/m <sup>2</sup> Bq Gy Sv	m · m <sup>-1</sup> = <sup>(b)</sup> m <sup>2</sup> · m <sup>-2</sup> = <sup>(b)</sup> s <sup>-1</sup> m · kg · s <sup>-2</sup> m <sup>-1</sup> · kg · s <sup>-2</sup> m <sup>2</sup> · kg · s <sup>-2</sup> m <sup>2</sup> · kg · s <sup>-3</sup> s · A m <sup>2</sup> · kg · s <sup>-3</sup> · A <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> · kg <sup>-1</sup> · s <sup>4</sup> · A <sup>2</sup> m <sup>2</sup> · kg · s <sup>-3</sup> · A <sup>-2</sup> m <sup>-2</sup> · kg <sup>-1</sup> · s <sup>3</sup> · A <sup>2</sup> m <sup>2</sup> · kg · s <sup>-2</sup> · A <sup>-1</sup> kg · s <sup>-2</sup> · A <sup>-1</sup> m <sup>2</sup> · kg · s <sup>-2</sup> · A <sup>-2</sup>	m · m <sup>-1</sup> = <sup>(b)</sup> m <sup>2</sup> · m <sup>-2</sup> = <sup>(b)</sup> s <sup>-1</sup> m · kg · s <sup>-2</sup> m <sup>-1</sup> · kg · s <sup>-2</sup> m <sup>2</sup> · kg · s <sup>-2</sup> m <sup>2</sup> · kg · s <sup>-3</sup> s · A m <sup>2</sup> · kg · s <sup>-3</sup> · A <sup>-1</sup> m <sup>-2</sup> · kg <sup>-1</sup> · s <sup>4</sup> · A <sup>2</sup> m <sup>2</sup> · kg · s <sup>-3</sup> · A <sup>-2</sup> m <sup>-2</sup> · kg <sup>-1</sup> · s <sup>3</sup> · A <sup>2</sup> m <sup>2</sup> · kg · s <sup>-2</sup> · A <sup>-1</sup> kg · s <sup>-2</sup> · A <sup>-1</sup> m <sup>2</sup> · kg · s <sup>-2</sup> · A <sup>-2</sup>

(a) ラジアン及びステラジアンの使用は、同じ次元であっても異なる性質をもった量を区別するときの組立単位の表し方として利点がある。組立単位を形作るときのいくつかの例を示す。

(b) 実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号“1”は明示されない。

(c) 測光学では、ステラジアンの名称と記号srを単位の表し方の中にそのまま維持している。

(d) この単位は、例としてミリセルシウス度m°CのようにSI接頭語を伴って用いても良い。

表4. 単位の中に固有の名称とその独自の記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI 組立単位	SI 基本単位による表し方	
		名 称	記 号
粘力のモーメント面積	度	パスカル秒	$\text{Pa} \cdot \text{s}$
表面張力	度	ニュートンメートル	$\text{N} \cdot \text{m}$
角速度	度	ニュートンメートルラジアン	$\text{N} \cdot \text{m}$
角加速度	度	ラジアン毎秒	$\text{rad/s}$
熱流密度, 放射照度	度	ラジアン毎平方秒	$\text{rad/s}^2$
熱容量, エントロピー	度	ワット毎平方メートル	$\text{W/m}^2$
質量熱容量(比熱容量), 質量	度	ジュール毎ケルビン	$\text{J/K}$
熱容量エントロピー	度	ジュール毎キログラム	$\text{J/(kg \cdot K)}$
質量エネルギー(比エネルギー)	度	ジュール毎ケルビン	$\text{J/kg}$
熱伝導率	度	ワット毎メートル毎ケルビン	$\text{W/(m \cdot K)}$
体積エネルギー	度	ジュール每立方メートル	$\text{J/m}^3$
電界の強さ	度	ボルト毎メートル	$\text{V/m}$
体積電荷	度	クーロン毎立方メートル	$\text{C/m}^3$
電気変位	度	クーロン毎平方メートル	$\text{C/m}^2$
誘電率	度	ファラード毎メートル	$\text{F/m}$
透磁率	度	ヘンリー毎メートル	$\text{H/m}$
モルエネルギー	度	ジュール毎モル	$\text{J/mol}$
モルエンタルビ	度	ジュール毎モル毎ケルビン	$\text{J/(mol \cdot K)}$
モル熱容量	度	ジュール毎モル	$\text{J/mol}$
照射線量(X線及びγ線)	度	クーロン毎キログラム	$\text{C/kg}$
吸収線量	度	グレイ毎秒	$\text{Gy/s}$
放射強度	度	ワット毎ステラジアン	$\text{W/sr}$
放射輝度	度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	$\text{W/(m}^2 \cdot \text{sr)}$

表 5. SI 接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
$10^{24}$	ヨ	タ	$10^{-1}$	デ	シ
$10^{21}$	ゼ	タ	$10^{-2}$	セ	ン
$10^{18}$	エ	ク	$10^{-3}$	チ	リ
$10^{15}$	ペ	サ	$10^{-6}$	マイ	ロ
$10^{12}$	テ	ラ	$10^{-9}$	ナ	ノ
$10^9$	ギ	ガ	$10^{-12}$	ピ	コ
$10^6$	メ	ガ	$10^{-15}$	フ	ト
$10^3$	キ	ロ	$10^{-18}$	エ	ム
$10^2$	ヘ	ク	$10^{-21}$	ゼ	ト
$10^1$	デ	ト	$10^{-24}$	ブ	ト
		カ		ク	ト
		da		日	ト

表6. 国際単位系と併用されるが国際単位系に属さない単位

名称	記号	SI 単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1h = 60 min = 3600 s
日	d	1 d=24 h=86400 s
度	°	1° = $(\pi/180)$ rad
分	,	1' = $(1/60)^\circ = (\pi/10800)$ rad
秒	"	1" = $(1/60)'$ = $(\pi/648000)$ rad
リットル	L	$1l=1 \text{ dm}^3=10^{-3} \text{ m}^3$
トン	t	$1t=10^3 \text{ kg}$
ネーベ	Np	$1Np=1$
ベル	B	$1B=(1/2) \ln 10 (Np)$

表7. 國際単位系と併用されこれに属さない単位で  
SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
電子ボルト	eV	$1\text{eV}=1.60217733(49) \times 10^{-19} \text{J}$
統一原子質量単位	u	$1\text{u}=1.6605402(10) \times 10^{-27} \text{kg}$
天文単位	ua	$1\text{ua}=1.49597870691(30) \times 10^{11} \text{m}$

表8. 國際単位系に属さないが國際単位系と併用されるその他の単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
海里	里	1 海里=1852m
ノット	ト	1 ノット = 1 海里毎時=(1852/3600) m/s
アール	a	$1 \text{a}=1 \text{dam}^2=10^2 \text{m}^2$
ヘクタール	ha	$1 \text{ha}=1 \text{hm}^2=10^4 \text{m}^2$
バル	bar	$1 \text{bar}=0.1 \text{MPa}=100 \text{kPa}=1000 \text{hPa}=10^5 \text{Pa}$
オングストローム	Å	$1 \text{\AA}=0.1 \text{nm}=10^{-10} \text{m}$
バーン	b	$1 \text{b}=100 \text{fm}^2=10^{-28} \text{m}^2$

表9. 固有の名称を含むCGS組立単位

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
エ ル グ	erg	$1 \text{ erg} = 10^{-7} \text{ J}$
ダ イ ヌ	dyn	$1 \text{ dyn} = 10^{-5} \text{ N}$
ボ ア ブ	P	$1 \text{ P} = 1 \text{ dyne} \cdot \text{s}/\text{cm}^2 = 0.1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$
ス ト 一 ク ス	St	$1 \text{ St} = 1 \text{ cm}^3/\text{s} = 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$
ガ ウ ス	G	$1 \text{ G} = 10^{-4} \text{ T}$
エ ル ス テ ッ ド	Oe	$1 \text{ Oe} = (1000/4\pi) \text{ A/m}$
マ ク ス ウ ェ ル	Mx	$1 \text{ Mx} = 10^{-8} \text{ Wb}$
ス チ ル ブ	sb	$1 \text{ sb} = 1 \text{ cd/cm}^2 = 10^4 \text{ cd/m}^2$
ホ ザ ル	ph	$\text{ph} = 10^4 \text{ lx}$
	Cal	$1 \text{ Cal} = 1 - 10^{-4} \text{ J} = 2.10^{-2} \text{ J} = 2 \text{ erg}$

表10. 國際単位に属さないその他の単位の例

名称	記号	SI 単位であらわされる数値
ギュリ	Ci	$1 \text{ Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{Bq}$
レントゲ	R	$1 \text{ R} = 2.58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$
ラド	rad	$1 \text{ rad} = 1 \text{cGy} = 10^{-2} \text{Gy}$
レム	rem	$1 \text{ rem} = 1 \text{ cSv} = 10^{-2} \text{Sv}$
X線単位		$1 \text{X unit} = 1.002 \times 10^{-4} \text{nrem}$
ガンマ	$\gamma$	$1 \gamma = 1 \text{nT} = 10^{-9} \text{T}$
ジャニスキー	Jy	$1 \text{ Jy} = 10^{-26} \text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{Hz}^{-1}$
フルミ		$1 \text{ fermi} = 1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{m}$
メートル系カラット		$1 \text{ metric carat} = 200 \text{ mg} = 2 \times 10^{-4} \text{kg}$
トントル	Torr	$1 \text{ Torr} = (101.325/760) \text{ Pa}$
標準大気圧	atm	$1 \text{ atm} = 101.325 \text{ Pa}$
カ力	cal	
ミクロン	$\mu$	$1 \mu = 1 \text{pm} = 10^{-6} \text{m}$