

平成 22 年 4 月 30 日現在

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2007 年度～2008 年度

課題番号：19340067

研究課題名（和文） 超高輝度高分解能ビームラインの研究

研究課題名（英文） Study of Super High-intensity, High-resolution Beam Line

研究代表者

野海博之 (Noumi, Hiroyuki)

大阪大学・核物理研究センター・教授

研究者番号：10222192

研究成果の概要：

本研究成果の概要は次の通り。

- ・実験標的上でビーム粒子位置と運動量に強い相関を持たせた運動量分散型のビーム光学系を設計をした。研究会を通して反陽子を用いた物理の可能性について議論し、必要なビームラインについて検討した。
- ・J-PARC ハドロン実験施設の 2 次ビームライン建設を通してこの問題に取り組んだ。標的の直下流の電磁石を真空中で運転することにより、さまざまな熱的放射線的困難を解決した。
- ・K 中間子を分離抽出するための静電分離装置を開発した。K1.8BR における 2 次ビームの調整で、 π 中間子と陽子の分離が確認された。超高輝度高分解能ビームラインでも同じコンセプトで必要な性能が期待できることがわかった。
- ・2 次ビームによるプラスチックシンチレータからのシンチレーション光をイメージインテンシファイア管 (IIT) 付き撮像管カメラで撮影することによりビームプロファイルの観測を試みた。1.1MBq の ^{90}Sr ベータ線源による蛍光像の撮影に成功した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	4,900,000	1,470,000	6,370,000
2008 年度	2,600,000	780,000	3,380,000
年度			
年度			
年度			
総計	7,500,000	2,250,000	9,750,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：ビームライン、大強度、高分解能、運動量分散、2次粒子

1. 研究開始当初の背景

わが国のKEK陽子加速器施設(KEK-PS)は、世界に先駆けて長基線ニュートリノ振動実験の舞台となり、比較的良質の π 中間子ビームや米国のブルックヘイブン国立研究所(BNL)のAGS加速器に比べて弱弱しいK中間子ビームながらこれらを工夫して利用し、 Λ 、 Σ 、二重 Λ ハイパー核、K中間子原子核などのストレンジネス核物理分野の実験やK中間子崩壊による時間反転対称性やCP対称性の検証実験で多くの成果を挙げてきた。この十数年、これらの分野でわが国は世界をリードしてきた。そのKEK-PSはすでにJ-PARC建設のために運転を終了した。

J-PARCは、世界の高エネルギーハドロン加速器の中で、欧州や米国とともに世界3大ニュートリノビーム源の1つとなり、世界で唯一のK中間子工場となる。多様な2次ビームを用いた素粒子原子核物理研究を实践できる場として、J-PARCの重要性はいや増し、世界の研究者から非常に高い関心と期待を集めている。

KEK-PSは、最終的に6つの2次ビーム生成標的があり、多様な2次ビームが利用できた。一方、J-PARCのハドロン実験施設は当初、生成標的が1つである。しかし、複数のK中間子ビームラインが接続可能なように設計されており、さらなるビームラインの増設が望まれている。世界の利用者の要求に応え、多くの成果を排出するためには、J-PARCにおいて多種多様なビームラインを建設することが望まれる。本研究の開発しようとするビームラインは、J-PARCの大強度ビーム施設としてのポテンシャルを最大限有効に活用するものであり、多くの利用者が望む超高強度2次ハドロンビーム利用への新しい道を拓くものと期待している。

2. 研究の目的

本研究の目的は、これまでにない超高輝度高分解能2次ビームラインの開発研究を行うことである。日本原子力研究開発機構(JAEA)と高エネルギー加速器研究機構(KEK)が共同で建設が進められた大強度陽子加速器施設(J-PARC)は、平成21年4月に第I期建設で予定したすべての実験施設に対してビーム供給を開始した。J-PARCでは、実にメガワット級の高エネルギー陽子ビームが加速される予定であり、現在、加速器の調整が精力的に行われている。この世界最強出力の高エネルギー陽子ビームによって生成される世界最強の多様な2次粒子ビームを用いて、素粒子・原子核物理学研究において新しい飛躍と展開を図り、世界をリードしようとしている。J-PARCで生成される2次粒子のうち、GeV領域の π 中間子や反陽子ビームはこれまでにない画期的な高強度で生成される。これらは、ニュートリノやK中間子ビームと同様に、素粒子・原子核物理研究の中で重要な役割を果たす。一見、この非常に強いビームのおかげで実験効率が100~1000倍に向上し新しい研究展開が期待できそうである。残念ながら、実際にはこんな強いビーム環境下では測定器がまともに働かず実験できない。これでは室の持ち腐れである。非常に強いビームを有効に利用するための工夫が必要とされている。

2次ビームは空間的運動量的に一定の広がり(位相空間上の広がり)を持っているので、高精度や高感度が求められる素粒子・原子核物理実験においては反応や反応生成物を特定するためにビームを構成する粒子1つ1つの空間位置と運動量の測定が必要である。上述のような強いビーム下では、現在の測定器や

電子回路では応答速度が足りず、まったく使えないか計数効率を著しく低下させ、ビーム粒子の情報がまともに得られず、実験精度を著しく損なってしまい研究にならない。

2次ビームの位相空間上の分布の仕方に強い相関を持たせることができれば、1つの情報で他の情報を得ることができる。具体的には、実験標的上でビーム粒子位置とその運動量に強い相関をもつビームを形成するようにビームラインを設計すれば、反応点の情報からビームの運動量がわかる。反応点は反応後の粒子（散乱粒子や反応生成物からの崩壊粒子）の軌跡から知ることができるので、ビーム粒子の直接測定は不要になる。これは、非常に強いビームをあますことなく利用する有力な手段を提供する。さらに、相関の強さを注意深く選べばこれまで以上に高分解能の運動量分析も可能となる。本研究では、このようなGeV領域の2次ビームを非常に高輝度、かつ/または、高い運動量分解能のビームラインを開発し、超高強度2次ビーム利用への新しい道を拓く。

3. 研究の方法

本研究課題の研究期間は、J-PARCのとくに素粒子原子核実験施設の建設期の最後の2年間に重なる。よって、多くの研究は、J-PARCの、とくに、ハドロン実験施設の建設における、ビームラインや周辺機器の開発を行う過程で実施された。研究の過程で、得られた成果やアイデアはJ-PARCの建設に生かされたり、逆に多くの宿題や課題をもらった。

4. 研究成果

(1) π 中間子ビームラインの設計： Λ ハイパー核精密分光に適した、1～2GeV/c領域の π 中間子ビームラインを想定して設計を行った。そのうえで、より一般的な需要にも十

分対応できるような仕様を検討した。実験標的上でビーム粒子位置と運動量に強い相関を持たせた運動量分散型のビーム光学系を考えることにより、ビーム粒子の測定をしなくても反応点の位置からビーム運動量の分析が可能になるように設計を行った。

(2) 反陽子ビームラインの設計：本研究課題では研究会を通して反陽子を用いた物理の可能性について議論した。研究当初は、ハイペロン対生成を利用したハイペロン散乱やハイパー核とくに $S=-2$ 以下のハイパー核分光研究の可能性を検討した。これに加え、議論の中から新たな研究の可能性が指摘された。とくに、2つの興味深い研究の可能性について取り上げ、そのためのビームラインについて検討した。

(3) 2次ビーム取り出し部の設計：大強度1次ビームが照射される2次粒子生成標的周辺では膨大なパワーが解放され極度の高温場高放射線場が形成される環境下においても安定した運転・安全な保守が可能な、耐熱耐放射線ビームライン電磁石および周辺機器の設計を行う必要がある。本研究課題ではJ-PARCハドロン実験室の2次ビームライン建設を通してこの問題に取り組んできた。K1.8/K1.8BRラインの2次ビーム取り出し部は、標的の直下流の電磁石を真空中で運転することにより、さまざまな熱的放射線的困難を解決した。

(4) ビームの高純度化：標的で生成される様々な二次粒子からK中間子を分離抽出するための静電分離装置が開発され、J-PARCのハドロン実験施設のK1.8/K1.8BRビームラインに設置された。2009年2月にK1.8BRにおいて2次ビームの取り出しと調整が開始された。このとき静電分離装置は300kV程度でならし運転も行った。このとき、1.1GeV/cの運動量

領域において π 中間子と陽子の分離が確認されている。このときのビーム調整データから、超高輝度高分解能ビームラインにおいても K1.8/K1.8BR と同じコンセプトの静電分離装置およびマススリットシステムを導入すれば π 中間子ビームに対する K 中間子の混入率を 10^6 分の 1 程度にすることは十分期待できることがわかった。

(5) ビームモニターの開発: 2 次ビームによるプラスチックシンチレータからのシンチレーション光をイメージインテンシファイア管 (IIT) 付き撮像管カメラで撮影することによりビームプロファイルの観測を試みた。1.1MBq の ^{90}Sr ベータ線源を用いて 2mm 厚のプラスチックシンチレータを光らせ、その蛍光による像の撮影に成功した。S/N は非常に良好であった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 7 件)

- 1) “Radiation Damage Test of Permanent Magnet Materials for Residual Gas Ionization Profile Monitor”

Y. Sato, 他

Proc. of the 4rd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 32th Linear Accelerator Meeting in Japan, WP29, 2007.

- 2) “Development of indirect-cooling radiation-resistant magnets”

H. Takahashi, 他

Proc. of the 4rd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 32th Linear Accelerator Meeting in Japan, FP36, 2007.

- 3) “Beam Diagnosis Devices of a High Power Proton Beam Line Facility”

H. Noumi, 他

Nuclear Science Symposium 2007 Conference Record, N51-003, 2007.

- 4) “Development of indirect-cooling radiation-resistant magnets”

H. Takahashi, 他

IEEE Transactions of Applied Superconductivity Vol. 18, pp.322-325, 2008.

- 5) “Electrostatic separator for K1.8 beam line at J-PARC”

M. Ieiri, 他

Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B266, pp4205-4208, 2008

- 6) “Beam Collimators at J-PARC Hadron Facility”

H. Takahashi, 他

Proc. of the 5rd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 33th Linear Accelerator Meeting in Japan, WP015, 2008.

- 7) “Development of OTR beam profile monitor for J-PARC hadron beamline(3)”

A. Toyoda, 他

Proc. of the 5rd Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 33th Linear Accelerator Meeting in Japan, WP019, 2008.

[学会発表] (計 16 件)

- 1) “Radiation Damage Test of Permanent Magnet Materials for Residual Gas Ionization Profile Monitor”

里嘉典, 他

第 4 回加速器学会年会・第 32 回リニアック技術研究会, 2007 年 8 月 1 日～3 日

- 2) “Development of indirect-cooling

- radiation-resistant magnets” ,
高橋仁, 他
 第 4 回加速器学会年会・第 32 回リニアック技術研究会, 2007 年 8 月 1 日～3 日
- 3) “大強度 2 次ビームを用いた精密原子核ハドロン物理の新展開”,
野海博之
 RCNP ワークショップ「J-PARC ハドロン実験施設のビームライン整備拡充に向けて」、大阪大学核物理研究センター, 2007 年 11 月 11 日～12 日
- 4) “高運動量ビームラインとそこでの物理”,
澤田真也
 RCNP ワークショップ「J-PARC ハドロン実験施設のビームライン整備拡充に向けて」、大阪大学核物理研究センター, 2007 年 11 月 11 日～12 日
- 5) “J-PARC における原子核・ハドロン物理実験の展開” ,
野海博之,
 KEK 主催「原子核・ハドロン物理：横断研究会」, KEK, 2007 年 11 月 19 日～21 日
- 6) “Hypernuclear Spectroscopy with a High-Resolution Beam Line”
H. Noumi
 The 4th International Workshop on Nuclear and Particle Physics (NP08), Mito, Ibaraki, March 5-7.
- 7) “Towards Upgrade of the J-PARC Hadron Experimental Facility”
 - Summary of a related RCNP workshop -”
H. Noumi on behalf of the RCNP workshop organizers
 The 4th International Workshop on Nuclear and Particle Physics (NP08), Mito, Ibaraki, March 5-7.
- 8) “Experimental Plan at the J-PARC 50-GeV PS”,
H. Noumi,
 Workshop between IMP and RCNP, Lanzhou, March 14, 2008.
- 9) “J-PARC でのハイパー核分光” ,
野海博之
 実験核物理領域, 理論核物理領域合同シンポジウム
 「S=-1 ハイパー核研究の展開 ～SKS 15 年, Hyperball 10 年の成果と今後～」
 日本物理学会, 2008 年 3 月 23 日
- 10) “Experimental Plans at the J-PARC Hadron Experimental Hall”,
H. Noumi
 Advanced Studies Institute Symmetry and Spin (SPIN-Praha-2008), Prague, July 20 –July 26, 2008.
- 11) “Beam Collimators at J-PARC Hadron Facility” ,
高橋仁, 他
 第 5 回加速器学会年会・第 33 回リニアック技術研究会, 2008 年 8 月 6 日～8 日
- 12) “Development of OTR beam profile monitor for J-PARC hadron beamline(3)” ,
豊田晃久, 他
 第 5 回加速器学会年会・第 33 回リニアック技術研究会, 2008 年 8 月 6 日～8 日
- 13) “超高強度 2 次ビームで展開する精密ストレンジネス核分光”,
野海博之

理研-RCNP 研究会「J-PARC ハドロン物理(*)の将来研究計画を考える」研究会、理研、2008年9月1日-2日。

- 14) “Experimental Plans at the J-PARC Hadron Experimental Hall”,

H. Noumi

ASIA Science Seminar on “Frontier Science at High-intensity Proton Accelerator”, Beijing, October 19–October 25, 2008.

- 15) “大強度2次ビームで展開する精密フレーザー核物理”,

野海博之,

科研費特定領域研究「ストレンジネスで探るクォーク多体系」

山代温泉, 2008年10月29日—31日。

- 16) “ハドロン実験施設の建設とビームコミッショニング”,

里 嘉典,

「J-PARC ハドロン実験ホールへの最初のビームを記念するワークショップ」

東海村、いばらき量子ビーム研究センター, 2009年3月25日—26日。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

野海博之(Noumi Hiroyuki)

大阪大学・核物理研究センター・教授

研究者番号：10222192

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者

澤田 真也(Sawada Shinya)

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核

研究所・准教授

研究者番号：70311123

高橋 仁(Takahashi Hitoshi)

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核
研究所・助教

研究者番号：60353372

家入 正治(Ieiri Masaharu)

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核
研究所・准教授

研究者番号：50192472

里 嘉典(Sato Yoshinori)

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核
研究所・准教授

研究者番号：30342603

豊田 晃久(Toyoda Akihisa)

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核
研究所・助教

研究者番号：20373186