

# J-PARC における重イオン加速の検討

## STUDY OF HEAVY ION ACCELERATION IN J-PARC

原田寛之<sup>#, A)</sup>, サハプラナブ<sup>A)</sup>, 金正倫計<sup>A)</sup>  
Hiroyuki Harada<sup>#, A)</sup>, Pranab Kumar Saha<sup>A)</sup>, Michikazu Kinsho<sup>A)</sup>  
<sup>A)</sup> JAEA/J-PARC

### Abstract

Recently, humankind had big discovery about neutron star, which is great big nuclear in the space. They are discovery of neutron star with twice mass of solar in 2010 and observation of gravity wave when two neutron star incorporate in 2017. In order to understand the high dense matter like the neutron star, project of experimental researches by using accelerated heavy ion beams become heated in the world, such RHIC-BES-II, FAIR project, NICA project, etc. The J-PARC facility consists of three accelerators, which are 400-MeV linac, 3-GeV Rapid Cycling Synchrotron (RCS) and Main Ring synchrotron (MR). These accelerators provide MW class high intensity proton beams to the targets, and secondary beams after hitting the proton to the targets are used in many experiments and researches. We have simulation study of the heavy ion beam in J-PARC to fully utilize high intensity ability of J-PARC. We propose the accelerator scheme of the beam in J-PARC and the intensity will reach to the world record. In our talk, we will report the current status of proton beam and introduce the accelerator scheme for the high-intensity heavy ion beam in J-PARC.

### 1. 学術的背景

超新星爆発後に宇宙に浮かぶ宇宙最高密度の巨大な原子核である「中性子星」に関して、近年大きな発見があった。一つは、2010 年電磁波による天体観測で太陽の 2 倍の質量を持つ中性子星が発見された[1]。これは従来の理論ではブラックホールになってしまう質量で、原子核理論では説明できないものであり、「ハイペロンパズル」と呼ばれている。さらに、2017 年中性子星同士の合体で発生した重力波の観測に人類で初めて成功した[2]。合体初期の重力波は中性子星同士の質量の情報を含んでいるが、加えて合体過程の重力波は中性子星の硬さを示す状態方程式に依存した情報を含み、中性子星内部の情報を提供する。つまり、人類が未だに解明できていないこの中性子星に関して、電磁波観測で表面の情報が、重力波観測によって内部の構造情報が観測的証拠として取得可能になった。現在、GeV 級の高エネルギーまで加速し収縮された重イオンを衝突させることにより地球上にて実験可能な、ミニ中性子星合体と相似の宇宙最高密度物質の研究やハイパー核の研究が世界中で加熱している。実施中の米国 RHIC 加速器におけるエネルギー走査実験 (RHIC-BES-II) に加え、ドイツ FAIR 計画、ロシア NICA 計画、中国 HIAF 計画などの数百億から数千億円規模の新規の大型研究計画が進められている。

我が国が誇る大強度陽子加速器施設 J-PARC においても既存の加速器を活用し、核子あたりの重心系エネルギーで GeV 級まで加速し、世界最高強度で重イオンビームを供給する計画が立ち上がっている。その計画は、J-PARC 重イオン計画 (J-PARC Heavy Ion program; J-PARC HI) [3] と呼ばれ、現時点で総勢 140 名の国際コラボレーションが立ち上がっており、非常に期待値は高い。

本稿では、J-PARC と陽子ビームの性能状況などを報

告する。その J-PARC における重イオン加速の検討結果、重イオン用入射器として新設を予定している重イオンリニアック、重イオンブースターを紹介し、特に重イオンブースターのビーム光学設計の状況を報告する。



Figure 1: J-PARC facility air photograph. Orange shows accelerators and blue shows experimental facilities. Yellow shows newly planned heavy ion injector.

### 2. J-PARC と陽子ビーム出力実績

大強度陽子加速器施設 J-PARC[4]は、400MeV 負水素リニアック、3GeV シンクロトロン (RCS)、主リングシンクロトロン (MR) の 3 基の加速器で構成されている。リニアックで 400MeV まで加速された負水素イオンビームは、RCS で陽子へと変換されながら約 300 周回にわたってビーム蓄積 (2 バンチ) が行われ、蓄積入射後 20ms で 3GeV まで加速され、25Hz の繰返しで入出射を行っている。より多くの粒子を蓄積し、より速く加速し供給する事で大強度出力 (エネルギー × 平均電流) を可能としている。大半のビームは、中性子・ミュオン粒子を生成する物質生命科学実験施設 (MLF) へ供給され、数秒に 4 パルスの

<sup>#</sup> hharada@post.j-parc.jp

み MR への入射のために供給している。MR では、RCS から 3GeV の陽子ビームを 4 パルス(計 8 バンチ)入射・蓄積し、入射後 30GeV まで加速している。加速されたビームは、1 度に全てのビームを出射する速い取り出しでニュートリノ実験施設 (NU)、もしくは徐々に出射する遅い取り出しでハドロン実験施設 (HD) に供給している。

J-PARC における陽子ビームの所期目標と現在までの実績を Table 1 に示す。リニアックと RCS では、2008 年の供給運転開始から順調に出力を増強しており、2018 年 7 月に MLF 施設へ所期目標である世界最高レベルの 1 MW 出力の 1 時間の安定運転、2019 年 7 月には 12 時間の安定運転に成功し、世界最高峰の安定な大強度出力の実績を有する[5]。今後、MLF 施設の中性子生成水銀標的の状態を監視しながら利用運転での出力を 500 kW から 1 MW へ徐々に上げていく。加速器としては更なる大強度出力 1.5 MW に向けて研究開発を進めている[6]。MR の NU 実験への供給では、目標を超える粒子数で大強度出力 484 kW の実績を有し、今後電源や高周波加速空洞の改造を経て、約 2 倍の高繰返化により目標 750 kW を超える出力を目指す。MR の HD 実験への供給では、順調に出力が増強しており、51 kW の安定運転の実績を有している。今後、ビームの安定化や標的状態の監視を行いつつ、目標 100kW を超える出力を目指す。また、この HD への遅い取り出し運転では、世界最高レベル 99.5%(ドイツ GSI 研究所 SIS18 加速器の実績: 約 70%) の遅い取り出し効率を達成しており、大強度化に必須となる取り出し部でのビームロス低減の実績を有する。

このように、J-PARC 加速器は約 10 年間の歳月をかけて得た、陽子ビームを用いた詳細な理解、ビーム力学に基づく現実的な計算モデルの構築、世界最高レベルの大強度出力や取り出し効率の実績など、大強度出力調整や安定運転の豊富な経験を有している。そのため、J-PARC における GeV 級の重イオン加速計画は、早期の大強度出力の実現性という観点から、国外で計画・建設されている GeV 級の重イオン加速器計画と比較して非常に高い優位性を有していると言える。

### 3. J-PARC における重イオン加速の検討

現存の RCS と MR を活用し重イオンビームを GeV 級まで加速する上で、陽子ビームとの違いを考慮しなければならない。陽子と重イオンの主な違いは以下である。

1. 電荷数や質量
2. 異なるビーム入射ならびに蓄積手法
3. 低電荷重イオンビームの真空中残留ガスによる電子剥離や電子捕獲

さらに、RCS は MLF 実験施設への陽子ビーム供給が責務であり、その供給を行いつつ MR 行きのビームを重イオンビームに切り替える必要がある。RCS では、25Hz のビーム供給においてパルス毎の行先やビーム出力・質の切り替えは現状でも実現しているが、主電磁石の励磁量はパルス毎に切り替えできない。一方、MR は NU 施設への供給と HD 施設への供給では、独立なパラメータで運転しており、共存可能である。つまり、重イオンビームを既存の施設に入射し加速する上で、RCS が J-PARC において制限を多く持っている。

Table 1: Characteristic Parameters of Target and Performance for J-PARC Accelerators

リニアック	所期目標	運転実績
エネルギー	400 MeV	400 MeV
ピーク電流	50 mA	50 mA
パルス長	0.5 msec	0.5 msec
繰返し	25 Hz	25 Hz
RCS	所期目標	運転実績
エネルギー	3 GeV	3 GeV
粒子数 (MLF)	$8.3 \times 10^{13}$ 個	$8.4 \times 10^{13}$ 個
繰返し (MLF)	25 Hz	25 Hz
出力 (MLF)	1 MW	1 MW
MR	所期目標	運転実績
エネルギー	30 GeV	30 GeV
粒子数 (NU)	$2.0 \times 10^{14}$ 個	$2.5 \times 10^{14}$ 個
繰返し (NU)	1.3 sec	2.48 sec
出力 (NU)	750 kW	484 kW
粒子数 (HD)	$1.1 \times 10^{14}$ 個	$5.5 \times 10^{13}$ 個
繰返し (HD)	5.2 sec	5.2 sec
出力 (HD)	100 kW	51 kW

まず、重イオンビームのリジリティ(運動量/電荷数) の関係を陽子と同じにする事で、電磁石による曲げ角や収束力は同じになり、ビーム力学的に陽子と同様の横方向運動をするため、上記 1 は解決できる。上記 2 に関しては、新たなビーム入射システムの構築が必須となるが、多周回入射による蓄積可能なシステムにするには、RCS 周回ビームラインでの機器設置のスペースが不足している。そのため、RCS の前段にパルスビームを蓄積する能力を持つリングを配置し、RCS ではパルスビームを 1 周回で入射する、つまりキッカー電磁石を 2 台のみ配置する事で上記 2 は克服できる。上記 3 に関しては、現状の超高真空より 2 桁真空度が高い極高真空システムが必須となり、RCS や MR での大規模な改造が要求される。そこで、米国 BNL の AGS 加速器と同様に低電荷ではなく、高電荷もしくは全電子剥離の状態で加速することで上記 3 を克服できる。残留ガスとの相互作用を考慮した計算による見積もりでは現在の真空度であっても RCS では 0.12%しかロスしない。しかしながら、高電荷にすることで大強度ビーム出力時のビーム内相互作用の空間電荷力に伴う効果の増大が懸念されるが、RCS や MR は大強度ビームの能力や実績(陽子ビームで  $10^{14}$  個)があり、空間電荷力を考慮した現実的な計算モデルを用いたシミュレーションでは、世界記録の一桁高い  $10^{11}$  個の重イオン粒子数でも 0.05%以下と大きなビームロスなく加速可能であると検討結果となった。

現在、実験計画に合わせ、陽子からウランまでのビー

ムを想定し陽子と中性子の比率の違いが大きく重いウランの加速スキームを Table 2 に示す。ちなみに、軽くなるにつれて、現在供給している陽子ビームに近づく。各加速器で加速後、高電荷へ荷電変換する際に、ある割合で粒子数やエネルギーは減る。最終的に MR には RCS から 4 回から 8 回入射する事ができ、現在は 4 回入射後 GeV 級まで加速された  $4.0 \times 10^{11}$  個 を設計の粒子数としている。COMET 実験に向け、陽子ビームで 8GeV 加速・取り出しにすでに成功しており、実験側の要求に併せてイオン核種を軽い方に、エネルギーを低い方に変更することが可能である。

Table 2: Heavy Ion Parameters of J-PARC HI

加速器	イオン	核子あたりエネルギー	粒子数
HI リニアック	U <sup>35+</sup>	20 MeV/u	$2.0 \times 10^{11}$
HI ブースター	U <sup>66+</sup>	67 MeV/u	$1.5 \times 10^{11}$
RCS	U <sup>86+</sup>	735 MeV/u	$1.1 \times 10^{11}$
MR	U <sup>92+</sup>	11.06 GeV/u	$4.0 \times 10^{11}$

#### 4. 新設の重イオン入射器の検討

本計画では、Fig. 1 中の黄色で示すような重イオン入射器施設を建設し、重イオンリニアックとブースターリングを新設する。入射器の概要を Fig. 2 に示す。この入射器では、重イオンビームを生成・加速し、パルスビームとして蓄積する能力を持たせ、RCS の入射エネルギーまで加速させる。リニアックだけで加速すると、陽子用のリニアックと同規模の施設が必要となるが、リングを設ける事で、Fig. 1 で示すように、RCS の半分以下の規模の入射器となる。

リニアックは、理研 RIBF、米国 FRIB、ドイツ GSI で確立しているイオン源、常伝導・超伝導の空洞技術、ビーム輸送技術を採用し建設すべく、ビーム光学設計を進めている。本稿では、大強度ビーム蓄積機能を持たせるブースターリングに関して述べる。

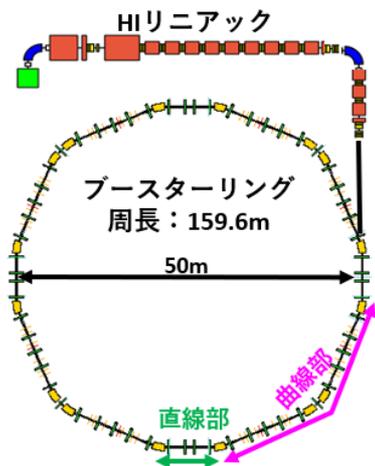


Figure 2: New heavy ion injector (LINAC and booster).

ブースターリングでは、大強度の重イオンビーム蓄積に向け、非線形磁場の少ない大口径電磁石、周波数変動の大きな加速空洞、残留ガスによる電子剥離、入射手法、空間電荷効果などを考慮しなければならない。大口径電磁石は RCS と同規模の口径で磁極長が短い電磁石となり、加速空洞は RCS の加速空洞の周波数共振点をコンデンサーで変更したものとなり、RCS ですでに実用化している。次に、残留ガスによる電子剥離に関して、RCS や MR の場合と同様に高電荷にすることで残留ガスによる電子剥離を抑える。もちろん、高電荷の場合には空間電荷効果の影響が大きくなるため、空間電荷効果に強い光学設計が重要となる。ビーム入射は、ドイツ GSI と同様の手法で世界記録と同レベルまで、RCS の陽子と同様の荷電変換入射で一桁高い強度まで蓄積することを目指している。荷電変換入射では、平衡電荷値を中心に  $\pm 2$  の電荷を蓄積可能な光学設計を行っている。大強度出力時に、一番懸念されるのが、空間電荷効果である。空間電荷効果は、粒子間相互作用にて収束磁場が弱められ、1 周回する間の横方向振動数の変化により共鳴条件に抵触する粒子が増え、エミッタンスが増大し、ビームロスへと繋がる効果である。つまり、共鳴条件の強さと横方向振動数の変化度合い(拡がり) がビーム強度を制限する。そこで、RCS での大強度ビームの経験から、このブースターでは世界最高強度の実績を持つ 3 回対称性の RCS とは異なり、4 回対称性のリングにし、振動数の動作点の近傍の共鳴を弱め、RCS より安定領域が広い光学を設計した。そのブースターの光学パラメータ(ベータ関数と分散関数)を Fig. 3 に示す。分散関数の大きな長い曲線部とゼロの短い曲線部で構成していることがわかる。この光学構造は、いくつかの電荷値のイオンを安定に蓄積するために、分散関数の高い場所で六極電磁石や八極電磁石による中心軌道や光学パラメータをマッチさせるために重要な構造である。

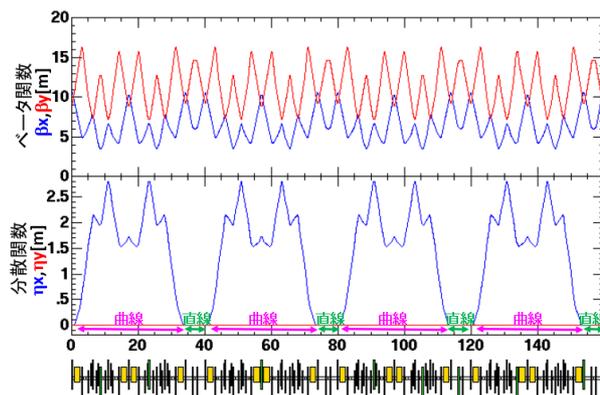


Figure 3: Beta functions (top) and dispersion functions (bottom) around the booster ring.

また、大強度蓄積時の RCS とブースターでの横方向振動数マップにおける共鳴線と振動数拡がりを Fig. 4 に示す。簡易的な計算による横方向振動数の拡がりは、

1. 電荷数に比例 (RCS の 2/3 倍)
2. 粒子数に比例 (RCS の 3/2 倍)
3. 速度 ( $\beta^2 \gamma^3$ ) に反比例 (RCS の 3 倍)
4. ビームエミッタンスに反比例 (RCS の 1/2 倍)
5. 周長に比例 (RCS の 1/2 倍)

に依存し、実績のある RCS の入射時と比較し、約 3/4 となる。つまり、Fig. 4 に示すように、RCS と比較して共鳴条件の弱さと広い安定領域の確保、約 3/4 の横方向振動数の拡がりから、ブースターリングにおける空間電荷効果は十分低く、大強度出力の可能性が高い。今後、空間電荷力を含めた多粒子シミュレーションを実施し、精度を高める必要がある。

度の高い検討結果、そして計画推進へと繋げていく必要がある。また、国際共同研究グループとして、加速器から実験まで網羅した統一的な検討も進めていく必要がある。しかしながら、現時点までの検討結果を総合すると、国際競争の高いこの分野において、大強度陽子出力の実績を有する J-PARC を活用した本計画は非常に優位性の高いと言え、大きな期待を受けている。

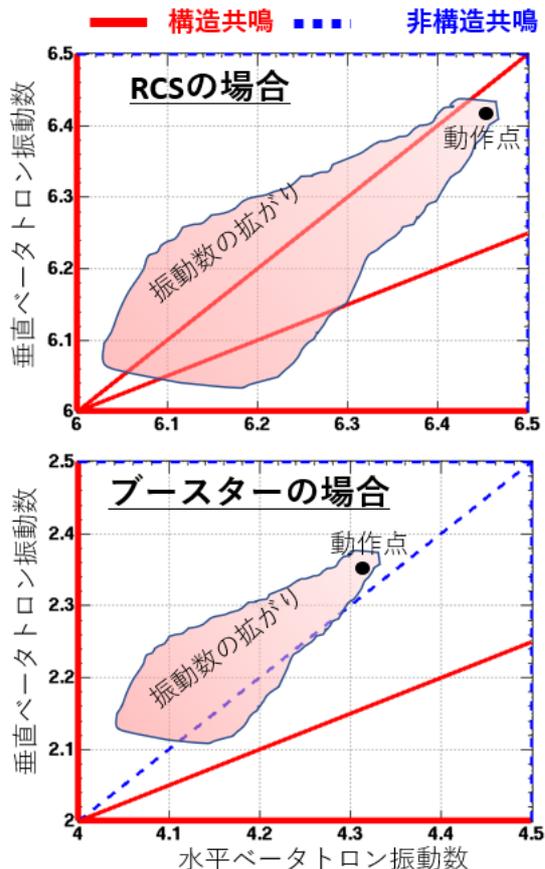


Figure 4: Tune map and tune spread of both RCS (top) and new Booster ring (bottom).

## 5. まとめ

宇宙に浮かぶ巨大な原子核である中性子星の物質構造の解明に向け、高密度核物質を生成可能な GeV 級重イオン加速器計画が世界中で立ち上がっており、この分野の国際競争は非常に加熱している。我が国が誇る大強度陽子加速器施設 J-PARC においても既存の加速器を活用し、世界最高強度で GeV 級の重イオンビームを供給する J-PARC 重イオン計画が立ち上がっている。J-PARC の既存の加速器を用いて、重イオンビームが加速可能かどうかを詳細に検討した。その結果、計画されている他計画の設計強度を 1 桁上回る能力が十分に備わっている可能性が高いことを示唆する結果となった。そこで、重イオンビームを既存の J-PARC 加速器である RCS に適合可能な重イオン用入射器の設計を行った。重イオン用リニアックとビーム蓄積能力を有するブースターリングの設計を行い、新たな荷電変換入射が可能であることを見出した。今後、さらに詳細な検討を行い、精

## 参考文献

- [1] P.B. Demorest *et al.*, “A two-solar-mass neutron star measured using Shapiro delay”, *Nature* 467, 1081-1083, (2010).
- [2] B.P. Abbott *et al.*, “GW170817: Observation of Gravitational Waves from a Binary Neutron Star Inspiral”, *Phys. Rev. Lett.* 119, 161101, (2017).
- [3] J-PARC Heavy Ion Project; <https://asrc.jaea.go.jp/soshiki/gr/hadron/jparc-hi/>
- [4] High-intensity Proton Accelerator Project Team, “Accelerator Technical Design Report for J-PARC”, JAERI-Tech 2003-044 and KEK Report 2002-13.
- [5] K. Hasegawa *et al.*, “Status of J-PARC accelerators”, in these proceedings.
- [6] H. Hotchi *et al.*, “Recent progress of the J-PARC RCS beam commissioning and operation: Efforts to realize a higher beam power beyond 1 MW”, in these proceedings.