

# J-PARC-HI のための提案書（暫定版）

J-PARC-HI Collaboration

2018 年 12 月 12 日

# 目次

1	はじめに	5
2	J-PARC-HI の物理	9
2.1	高密度物質の探索	9
2.2	ハドロン・ストレンジネス核物理	13
2.3	QCD の励起状態の測定	16
2.4	リニアックを利用する物理	17
3	J-PARC における重イオン加速	19
3.1	J-PARC 陽子加速器の現状	19
3.2	J-PARC における重イオン加速スキーム	20
3.3	J-PARC における重イオン入射器の新設	22
3.4	J-PARC における重イオン加速のまとめ	23
4	実験計画	24
4.1	E16 実験アップグレードによる J-PARC-HI 先駆実験	24
4.2	J-PARC-HI 本実験	25
4.3	ビームラインと実験エリア	28
5	組織体制、概算コスト、スケジュール	30
5.1	組織体制	30
5.2	概算コスト	30
5.3	スケジュール	31
6	総括と展望	32

## 概要

本提案書は、大強度陽子加速器施設 J-PARC において重イオンビームを新たに加速し、最先端の原子核物理研究を目指す「J-PARC 重イオン計画 (J-PARC Heavy-Ion project, J-PARC-HI)」を提案するものである。我が国の将来大型施設計画の一つとして日本学術会議のマスタープラン 2020 へ提案すべく、原子核物理コミュニティでの議論の基盤とする。

J-PARC 施設は、最先端の物質・生命科学、素粒子・原子核物理の実験研究が可能な世界に誇る複合研究施設である。この最先端の複合研究施設を最大限活用しつつ、研究成果を我が国から継続的に発信すべく、多くの次世代研究計画が提案されている。本提案書では、J-PARC 施設を活用して新たに重イオンビームを GeV 級のエネルギーまで加速し実験研究に利用し、国際競争の激しい宇宙最高密度物質の研究を大きく発展させることを目指す。

本提案書で提案する J-PARC-HI 計画では、重イオン入射器としてリニアックとブースターリングの加速器を新設し、既存の大強度陽子加速器である 3 GeV シンクロトロン (RCS) と 50 GeV 主リングシンクロトロン (MR) を用いて大強度の重イオンビームを GeV 級のエネルギーまで加速する。特に、現在大強度陽子ビームで素粒子・原子核実験を実施しているハドロン実験施設に、世界最高強度の重イオンビームを供給する。これにより「宇宙最高密度物質生成による強い力 (QCD) の相構造の解明や高密度核物質の状態方程式の研究」、「多ストレンジネス自由度による新粒子の生成と探索」、「媒質中でのハドロンの性質変化による QCD 真空の研究」というハドロン物理あるいは素粒子・原子核物理のフロンティアの開拓を目指す。そのために必要な高精度の実験や稀な事象の探索を実現するには、高統計実験が必須となり、大強度ビームが有用となる。

素粒子・原子核物理研究は世界中で展開されており、注目度の高い分野では、国際競争も激しさを増している。本提案書で提案する研究計画も同様であり、本計画以外に世界 2 カ所で新たに大型研究計画が進行しており、最も加熱した分野の一つとして熾烈な競合状態にある。既存の高性能の加速器を活用することで、他の計画と比べて一桁低い予算規模で、一桁高いビーム強度 (世界最高強度) を実現する可能性が高く、その意味では本計画は国際的優位性が高い。また、前人未踏の重イオンビームの大強度フロンティアでは、新たな物理研究領域を切り拓く可能性もある。

本計画における大型施設を実施する主要実施研究機関は J-PARC センター (日本原子力研究開発機構/高エネルギー加速器研究機構) である。また、実験研究を遂行する主要実施研究機関は、日本原子力研究開発機構・先端基礎研究センターと筑波大学であり、現時点における参加研究機関は、東京大学、広島大学、長崎総合科学大学、奈良女子大学、東北大学、京都大学、大阪大学、名古屋大学などの多くの研究グループにより構成される。さらに、国際共同研究として海外の研究機関も参加する予定である。

本計画では、重イオン入射器の新設と既存の施設との接続に 150 億円、実験整備・準備研究に 10 億円の計 160 億円を必要な経費として見込んでおり、ドイツ GSI-FAIR 計画の 2000 億円規模よりはるかに予算規模では低いとはいえ、大型予算が必要となる。本計画のスケジュールは、大型施設である新たな重イオン入射器 (リニアック、ブースターリング) の建設とビーム調整に 5 年、

既存の陽子加速器施設との接続とビーム調整に1年を予定している。その期間に並行して、検出器 R&D や陽子ビームを用いた性能試験を含む、実験整備や海外研究機関を利用した準備研究を行い、7年目より実験を開始する。また、マスタープラン 2017 の重点大型研究計画として既に採択されている「J-PARC 実験施設の高度化による物質の起源の解明」におけるハドロン施設拡張に伴う実験エリア拡張計画に沿って、実験規模も拡大する。

# 1 はじめに

強い力によって支配される物理現象は、真空上の励起として現れる多様なハドロン状態から初期宇宙や中性子星などの極限環境下で実現する相転移現象まで多彩を極めており、これら諸現象の理解は現代原子核・素粒子物理の中心的位置を占める重要課題である。これらの現象は全て、強い力の基礎理論である量子色力学 (QCD) が本質的な役割を担うが、QCD の非摂動的性質に起因する困難を背景に、この理論の誕生から半世紀近くを経た現代にあっても理論的な理解は発展途上であり、世界中で様々な研究が展開されている。

本提案書で提案する J-PARC 重イオン計画 (J-PARC-HI) は、我が国が誇る大強度陽子加速器施設 J-PARC での国内初となる相対論的重イオン衝突実験を実現し、強い力が支配する多様な物理現象の実験的解明を強力に推進させることを目指す将来計画である。本計画では、大強度陽子ビーム加速において世界最高レベルの蓄積・加速性能を有する J-PARC の 3 GeV シンクロトロン (RCS) と 50 GeV 主リングシンクロトロン (MR) の活用により、世界最高強度の重イオンビームを、競合する国外の計画の 1/10 程度の予算規模で効率的・安定的に供給することを目指す。MR の設計最高エネルギー\*1でウラン原子核を加速した場合の最高エネルギーは  $E_{\text{lab}} = 18.8 \text{ AGeV}$  だが、このエネルギーでの固定標的実験 ( $\sqrt{s_{NN}} \simeq 6.2 \text{ GeV}$ ) は、衝突時の圧縮による衝突物質の高密度化が最も進み、かつストレンジクォークの生成比率が最大になるエネルギー領域に位置する。J-PARC-HI の物理目標は、この特徴的なエネルギー領域での実験により、中性子星中心部をも凌ぐ超高密度状態の探索や、ストレンジクォークを 3 個以上含むハドロンやハイパー核の生成及び性質の研究といった、従来困難だった様々な実験研究を実現することである。

現在、J-PARC-HI の中心的研究課題として以下の 2 つを挙げる。

## 1. 宇宙最高密度物質の生成

重イオン衝突実験は、地上で行うミニ中性子星合体と表現できる。特に、J-PARC-HI の最高衝突エネルギー領域では、衝突時の圧縮により原子核密度の 5 倍以上に及ぶ超高密度物質が生成できることが JAM や UrQMD モデルによって予想されている。この特性を活かし、現在の宇宙では中性子星の中心部にしか存在しないストレンジクォークを含む超高密度物質を地上で人工的に作り出し、中性子星構造・合体の理解に欠かせない状態方程式などの物理量を直接的に研究する。これらの情報は、重力波等による中性子星合体の直接観測と相まって中性子星の理解を格段に進める重要な役割を担う。また、超高密度状態下では、「物質がその置き場所である真空を破壊する」相転移や、QCD 臨界点、カラー超伝導などの全く新しい物性現象が予想されており、J-PARC-HI が実現する超高統計実験によりこれらの世界初の観測が期待される。

## 2. 新種粒子探索

重イオン衝突実験は、陽子や軽イオンの衝突では生成が困難もしくは不可能なハドロン

---

\*1 陽子ビームで  $E_{\text{lab}} = 50 \text{ GeV}$

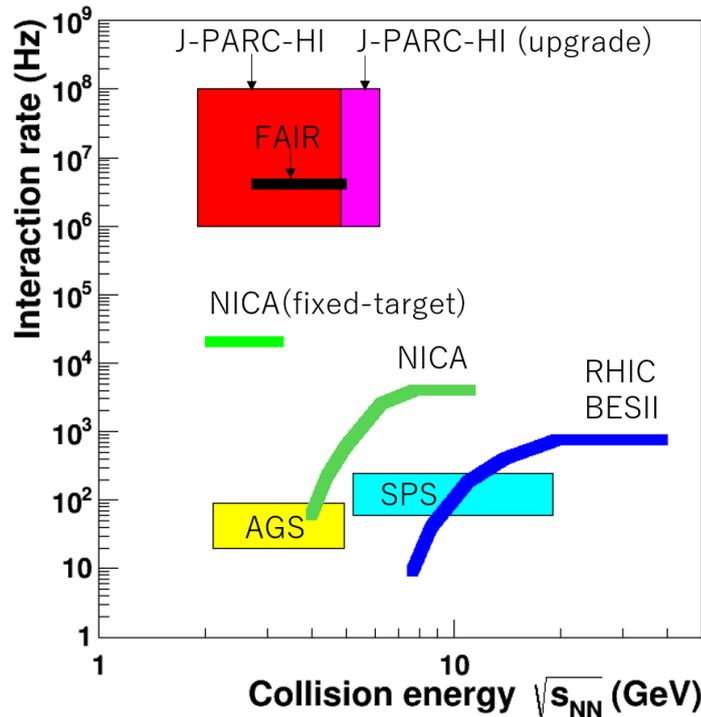


図1 世界の重イオン加速器施設における衝突エネルギーと衝突レートの比較。

ならびにハイパー核を生成できる、ユニークな新粒子生成工場でもある。新粒子探索には膨大な衝突イベントが必要とされるが、世界最高強度ビームを作り出す J-PARC-HI はこの目的に適している。また、J-PARC-HI のエネルギーは、重イオン衝突で最もストレンジクォークの生成比が増大する領域に位置しており、稀なストレンジハドロン、ハイパー核の探索に適している。例えば、J-PARC-HI では原子番号  $-1$  の  $\Xi^{-}nn$  等のハイパー核や最近スーパーコンピューター「京」で予言されたダイオメガ粒子などの新粒子の生成・観測が期待される。更に、多数の粒子が一度に生成される重イオン衝突ではこれらの粒子間の相互作用も測定可能である。J-PARC-HI が世界で初めて実現する超高統計実験により、未知の粒子の発見や、それらの相互作用の精査の進展が期待される。

これらの物理現象の解明を目標とする重イオン衝突実験は、J-PARC-HI の他にも現在世界各地で進展し、国際競争が加熱している。図 1 に世界の重イオン加速器施設の衝突エネルギーと衝突レートの比較を示す。米国 BNL の RHIC では、2019 年から BES-II (Beam-Energy Scan II) 計画が始動するほか、ロシア JINR の NICA 加速器 (2021 年開始予定)、ドイツ GSI の FAIR SIS-100 加速器 (2025 年開始予定) などが建設中であり、スイス CERN の SPS 加速器においても J-PARC-HI に近いエネルギーの重イオンビームによる研究が予定されている。また、中国の HIAF (High-Intensity Heavy-Ion Accelerator Facility) においても、核子当たり 0.8 GeV の重イオンビーム施設が 2025 年までに完成予定である。

NICA と FAIR は、J-PARC-HI と衝突エネルギーが重複している。しかし、J-PARC-HI はこれらの実験と比べ供給するビーム強度が一桁以上高いという著しい特徴を持ち、この特性を活用

し、より高統計、より稀な粒子の探索等によって国際競争を優位に進めることが期待できる。また、ビームエネルギーを広い範囲でスキャンし、様々な大きさの軽・重イオンの衝突実験を行うことによって、低温・低密度から高温・高密度に及ぶ相図の広い領域を研究することが可能である。さらに、J-PARC-HI では、陽子ビーム加速において高い実績を積んだ RCS ・主リングの活用と、新規設計の高性能重イオン入射装置を組み合わせることで、時間的、コスト的、人的資源を大幅に節約し、競合施設と比べ一桁以上高いビーム強度を、プログラム始動後速やかに安定的に供給することが可能である。実験的にも、全立体角を覆うハドロン測定による揺らぎの精密解析、大強度ビームを最大限に利用したダイミュオン測定、ビームラピディティ領域におけるマルチストレンジ系の探索等、特徴ある研究を行う予定である。ただし、競合する施設が既に実験準備を始めている現在、J-PARC-HI も速やかに計画を進める必要があることは言うまでもない。本提案書では、J-PARC-HI を早急に立ち上げ、世界に先駆けて強い相互作用の様々な未解決問題を解明することを提案するものである。

国内には、理研 RIBF 等の重イオンビーム施設がある。これらの施設の中で、J-PARC-HI は最もエネルギーが高い重イオン加速器施設となる。RIBF においては、核子当たり 1 GeV までの大強度重イオンビームを用いて、様々な不安定核の生成や、原子核密度の 2 倍程度までの核物質の状態方程式 (EOS) の研究を行っている。J-PARC-HI では、ストレンジネスを含む EOS の研究を、エネルギーと衝突系を変えることによって原子核密度の 2 – 10 倍の範囲において行うことが可能であり、RIBF における研究と相補的にさらなる高密度物質の探索の役割を担うことが期待される。

現在、J-PARC においては、世界最高強度の陽子ビームを用いたハドロン・ストレンジネスの実験研究が行われ、様々な研究成果を挙げている。J-PARC-HI の実現によってこれらの研究をさらに高密度、高ストレンジネスの物理へと展開することができ、相補的に強い相互作用の理解を発展させることができる世界的にも稀有な施設となる。

ハイパー核については、現在 J-PARC において行われているストレンジネス  $S = -1, -2$  のハイパー核の研究を  $|S| \geq 3$  へ展開できる。 $K^-pp$  等の K 中間子原子核の研究から、ストレンジレットやダイオメガなどの探索へ展開可能である。太陽質量の 2 倍の中性子星の発見によって予想よりも硬い EOS が必要となり、多くのストレンジクォークを含む柔らかい EOS のモデルは棄却されることとなった。この「ハイペロンパズル」を解くために重要な鍵となるのが、EOS を構築するためのハイペロン-核子、ハイペロン-ハイペロン相互作用である。現在の J-PARC プログラムでは、ハイパー核の研究によって、 $S = -1, -2$  の相互作用の研究が行われているが、J-PARC-HI においては、二粒子相関解析を行うことによって、 $|S| \geq 3$  の系を含む様々な粒子間の相互作用を研究することも可能となる。さらに、これから陽子ビームを用いて行われようとしている原子核内のハドロン質量スペクトルの変化を、より高密度において調べることが可能となり、ハドロン質量の起源に迫ることができる。

本提案書では、まず第 2 章において、J-PARC-HI での解明が期待される物理現象をより詳しく説明する。その後、第 3 章で加速器の概要、第 4 章で実験装置の設計について述べる。第 5 章

では計画の組織、コスト、及びスケジュールに関して記述する。

## 2 J-PARC-HI の物理

過去半世紀にわたり、原子核物理学は新しい実験的・理論的発見に駆動されながら研究対象とする物理現象を貪欲に拡張し、多様な成果を挙げてきた。原子核物理学が成立した湯川秀樹の時代に「素粒子」であった陽子と中性子は、その後ハドロンと呼ばれる粒子群の典型的な形態であり、またハドロンはクォークとグルーオンから構成されることが判明する。それに伴い原子核物理学も、その研究対象をストレンジクォークを含むバリオンを構成要素とする原子核であるハイパー核やハドロン構造・反応、そしてクォーク・グルーオン多体系へと拡張してきた。これらの領域で挙げられた研究成果は、重力波観測により盛り上がる中性子星の内部構造の探求などの様々な分野と関連して近年益々その裾野を広げ、発展を加速させている。

J-PARC 重イオン計画 (J-PARC-HI) は、相対論的エネルギー領域での重イオン衝突という我が国では初めての実験研究を実現し、原子核物理学の更なる進展を目指す将来計画である。この計画では、当初はウランビームで最大陽子エネルギーで 30 GeV に相当する  $E_{\text{lab}} = 11.1 \text{ AGeV}$  ( $\sqrt{s_{NN}} = 4.9 \text{ GeV}$ )、アップグレード後には最大陽子エネルギーで 50 GeV に相当する  $E_{\text{lab}} = 18.8 \text{ AGeV}$  ( $\sqrt{s_{NN}} = 6.2 \text{ GeV}$ ) での重イオン衝突実験を実現する。これまで、相対論的重イオン衝突実験は、米国の RHIC や欧州の LHC などの海外の研究施設で行われてきた。RHIC・LHC での実験は、超高エネルギーでの衝突により低バリオン密度・超高温状態を作り出すことを目的としたものである。RHIC での実験は、クォーク・グルーオン・プラズマ (QGP) 状態の生成実現という著しい成果を収め、その後の RHIC・LHC での実験により QGP の実験的探索は精密測定の世界へと足を進めている。

J-PARC-HI は、生成される物質密度が最大になるエネルギー領域である。J-PARC-HI で実現可能な衝突エネルギー領域の重イオン衝突実験は、

1. 宇宙最高密度の物質の生成による QCD 相構造や状態方程式等の研究
2. 多ストレンジネス自由度を利用した新粒子生成
3. 媒質中でのハドロンの性質変化による QCD 真空の研究

という3つのフロンティアを切り拓くのに適したエネルギー領域に位置しており、国内で実現するこの実験計画を通して我が国の原子核物理にさらなる発展と活性化をもたらすことが期待される。

以下では、J-PARC-HI の物理を、この3つの柱に分けて詳しく述べる。

### 2.1 高密度物質の探索

物質の密度をどこまでも上げていくと、何が起こるのだろうか。我々の身近な物質を形作る陽子と中性子は、「大きさ」を持った粒子だということが知られている。陽子と中性子が最密充填された物質を更に圧縮すると、陽子と中性子は押しつぶされてその粒子としての個性を失い、内部

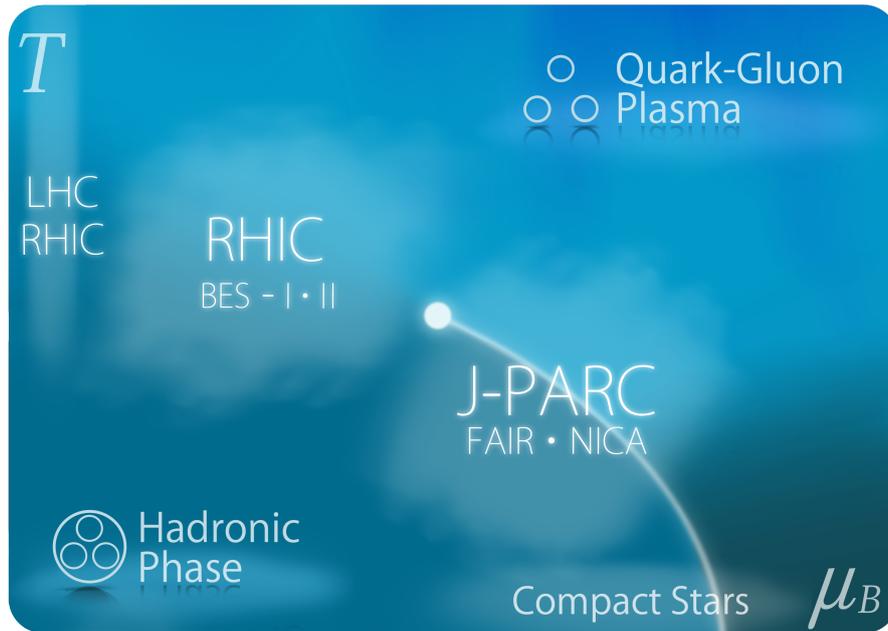


図2 QCD 相図と重イオン衝突実験が探索する領域

のクォークが飛び出し自由に動き回る物質状態が実現する。また、南部陽一郎が確立した「自発的対称性の破れ」理論によれば、物質の密度がこれほどに高くなると、物質の置き場所であるはずの真空が物質によって破壊され相転移を起こす。この相転移は、水と水蒸気の相転移のように不連続性を伴う一次相転移だと言われている。この一次相転移を図示したものが図 2 だが、この図に示すように、この一次相転移は高温領域側で途切れることが理論的に予想されている。この終点は QCD 臨界点と呼ばれており、様々な特異性を持つことから広く研究されてきた。

以上のような超高密度状態は、決して理論物理学者の描く夢物語ではない。実際、中性子星の中心部のような超高圧環境下ではこのような相転移が起こっていることが期待されており、近年重力波源や元素合成の舞台として注目される中性子星合体現象の理解を進める上では超高密度物質が引き起こすこれら諸現象の理解が必須となる。

このような超高密度状態を地上で作出す唯一の実験手段が、重イオン衝突実験である。ただし、RHIC や LHC のような高エネルギー重イオン衝突では衝突エネルギーが高すぎるため衝突する粒子がすり抜けてしまい、温度は高温になるが密度が上がらない。このため、高密度物質を作り出すためには程よく衝突時の圧縮が進むエネルギーでの衝突を行う必要がある。J-PARC-HI が実現する衝突エネルギー領域は高密度物質を作り出すのに最も適しており、衝突物質の最高密度は原子核の飽和密度の 5 倍以上に達することが予想されている。この特徴を活用し、人類未踏の高密度物質を研究するのが J-PARC-HI の最重要課題の一つである。特に、前述の一次相転移・QCD 臨界点を発見し、南部理論の予言を直接的に検証するのが重要な使命である。また、この一次相転移の先には、クォークの対凝縮状態であるカラー超伝導状態などの更に新奇な物質状態の存在が理論的に予言されているが、一次相転移発見の先にはこれらの現象の実験的探索も、更に野心的な課題として視野に入る。人類未踏の超高密度物質の探索を通して、これら自然の多様

な特質をあばき出し、現代物理学の自然観を検証し、また同時に素粒子・原子核物理学から天文学に及ぶ広範な分野の基礎となるデータを収集し、科学の発展に貢献することが J-PARC-HI の目標である。

J-PARC-HI での超高密度物質探索では、J-PARC-HI のもう一つの特徴である世界最高強度のビームが極めて重要な役割を担う。大強度ビームでの実験により、短時間で多数の衝突イベントを発生させ、各種観測量の高統計測定を実現することができる。実際、J-PARC-HI と同程度のエネルギー領域での重イオン衝突実験は AGS, SPS で数十年前に行われていたが、これらの実験の観測精度は状態方程式や相転移を議論するには不十分であった。一方、J-PARC-HI のビーム強度はこれらの実験と比べて 5 桁程度も高く、実験の解像度は文字通り桁違いである。この高統計実験を活用することで、様々な新しい観測量の精密測定を行い、超高密度物質の物性現象を探究するのが J-PARC-HI の狙いである。

以下に、本実験に於ける主要な物理測定を挙げる。

### 2.1.1 粒子フローによる超高密度物質の状態方程式の決定

粒子の大域的な流れ（フロー）は、生成物質の状態方程式ならびに衝突時のダイナミクスの情報を担う重要な観測量である。様々な次数（形状）のフローを測定することにより、これらの情報を詳細に得ることができる。例えば、1 次のフローは状態方程式の「柔らかさ」に敏感であるとされる量だが、高次のフローと結合することでこの議論を検証し、状態方程式を決定する道筋が見えてくる。2 次はアーモンド状の形状であり、3 次は三角形状である。一般に、3 次以上の量は、衝突領域における粒子位置の揺らぎと粒子間の相互作用に大きく影響され、フローの次数が上がるにつれて、例えば「ずり粘性」などの量に敏感になるため、高次数のフローの測定は、状態方程式の精密化に必須である。

RHIC や LHC 実験においては、高次（4 次以上）のフローの測定結果が得られ、それと流体モデルからの結果との比較によって、状態方程式、衝突ダイナミクスに関する理解が飛躍的に進んだ。J-PARC-HI のエネルギーは衝突領域が単純な流体モデルで扱えないことに加えて、実験結果が少ないことにより、モデル構築があまり進んでいない。近年、流体模型とハドロンカスケードとの統合模型などの、J-PARC-HI 領域の衝突ダイナミクスの模型が日本の理論グループによって提案され、現象論的研究が活性化しているが、これらの模型の検証には精度の高い高次フローの測定が必須である。J-PARC-HI が提供する高精度のフローのデータにより、衝突ダイナミクスの理解を精密化させることが可能となる。

一つ高い次数のフローの測定には、およそ一桁高い統計量が必要となるため、高統計の実験を行える J-PARC-HI は、他の施設に比べて、状態方程式ならびに衝突時のダイナミクスを調べられる理想的な実験施設であると言える。特に、1 次のフローは  $\sqrt{s_{NN}} = 4.8 - 7.7$  GeV の領域で測定が全くされていないが、最高密度状態の生成が期待されるこのエネルギー領域での測定は極めて重要である。

### 2.1.2 保存量のゆらぎによる QCD 相構造の探索

重イオン衝突実験での QCD 臨界点・一次相転移探索の観測手段として、現在もっとも活発に議論されているのは保存電荷の非ガウスゆらぎ（高次キュムラント）を用いる方法である。相転移点付近では一般に大きな熱ゆらぎが発生するが、このゆらぎを観測量に使う手法である。ゆらぎはキュムラントによって特徴づけられるが、QCD 臨界点付近では高次のキュムラントほど、増大や符号変化などの特徴的な振る舞いを持つことが指摘されており、高次キュムラントの測定が鍵となる。しかし、キュムラントは次数が一次上がるごとに必要な統計量が約 2 桁上がると言われており、次数が上がるほど実験的測定は困難になる。また、高次のキュムラントほど、粒子数測定時の検出効率低下の影響を強く受け、正確な測定が困難になる。このため、高い検出効率を持つ測定器を用い、大強度ビームにより高統計実験を行うことが極めて重要である。

RHIC で行われた BES 実験 (BES-I) では、様々な衝突エネルギーでおよそ  $10^7$  の衝突イベントを使って 4 次までのキュムラントを測定し、 $\sqrt{s_{NN}} = 7.7$  GeV 付近に非単調な振る舞いを発見し注目を集めた。しかし、この結果は統計誤差が大きく背後に潜む物理を議論するのに十分なデータとはいえない。また、7.7 GeV 以下のデータは得られていないため、今後より幅広いエネルギーで更に高統計のデータを得ることが切望される。

J-PARC-HI が実現する大強度ビームを使った実験は、高次ゆらぎ解析に適している。実際、J-PARC-HI が目指す大立体角ハドロン測定では、衝突レート 1 MHz での衝突実験を行い、RHIC-BES 実験 (BES-II) と同等の衝突イベントを数分の実験時間で集めることが可能である。RHIC では、BES-I 実験の改良版である BES-II 実験が予定されており、ここでは統計量が約一桁増加する見込みだが、J-PARC-HI ではこれを遥かに凌ぐ高統計測定が実現する。また、J-PARC-HI で実現する固定標的実験に最適化された検出器では、大立体角を高い検出効率で一様に覆うことが可能となり、高品質の解析結果を高い自由度で提供することが実現する。さらに、4 次キュムラントはもとより、さらに相構造に敏感な 5 次以上のキュムラントの解析も視野に入る。J-PARC-HI により初めて測定されるこれらの観測結果により、超高密度領域の相構造の理解が格段に進むことが期待できる。

### 2.1.3 (仮想) 光子および重クォーク対による超高密度物質の内部状態の探索

実光子および仮想光子は、衝突後あらゆるステージから放出され、各々のステージの熱力学的性質を持ち出す。そのため、RHIC や LHC の実験においては、クォーク・グルーオン・プラズマの温度を得られるとして、精力的に測定が行われてきた。J-PARC-HI のエネルギーにおいても、高密度核物質が生成されたならば、その温度を知る上で、必須の観測量である。高密度物質の温度測定に適していると考えられる領域は、実光子の運動量にて  $1 - 2$  GeV/c、仮想光子の不変質量にて  $1 - 2$  GeV/ $c^2$  である。このうち、仮想光子については、RHIC や LHC の実験では、チャームクォーク対からのバックグラウンドが大きすぎて測定が困難であるが、J-PARC-HI ではチャーム対の生成量が遥かに低くなるため、測定が可能になると考えられる。一方、チャームクォーク対は生成量が  $\phi$  メソンに比べて 5 桁以上低いが存在する。J-PARC-HI における高統計デ

ータによってその測定を目指す。RHIC や LHC では、 $J/\Psi$  の収量は、チャームクォーク間のデ  
バイ遮蔽効果によって減少し、一方コアレッセンス効果により増加する。いずれにせよ陽子・陽  
子衝突の場合に比べて変化することがわかっている。すなわち衝突初期の温度・パートン密度に  
敏感な量である。

J-PARC-HI ではクォーク・反クォーク対よりも、ダイクォークの寄与の方が大きくなると考  
えられる。したがって、チャームバリオンの測定も重要となると考えられる。

これらのチャームハドロンの測定をより容易にするためには、MR のエネルギーを 50 GeV に  
増強することが重要である。前述したように、生成される高密度物質の熱力学的状態に敏感な観  
測量なので、今後さらなる検討を進める予定である。

#### 2.1.4 究極の超高密度物質の探索にむけて

J-PARC-HI が誇る大強度ビームを活用して衝突事象を選別し、例えばより高密度の物質が生  
成された事象だけを選択することができる。JAM ハドロンカスケード模型によると、各衝突事象  
で到達する最高密度は衝突径数を固定したとしても事象ごとに揺らぎを持っている。従って衝突  
径数を 0 に固定した場合も、最高到達密度は分布は幅を持つ。もしも最高到達密度に強い相関を  
持つ観測量があれば、それを用いたトリガーによってより高密度側の事象のテールを実験的に選  
択できる可能性がある。JAM の研究では、この観測量の候補の一つとして全ハドロンの横運動量  
の和が挙げられている。大強度の J-PARC-HI では、この密度分布の高さが高くなり、それによっ  
てより高密度の事象を観測できる可能性が高くなる。

また、RHIC や LHC 実験で研究開発された新たな解析手法の一つに、Event Engineering とい  
う手法がある。従来は、衝突中心度や総エネルギー密度に注目して衝突事象の選別を行っていた  
が、例えば、フローが衝突初期の幾何学的形状に密接に関係するという実験事実を用いる手法など  
である。具体的には、前方・後方ラピディティでフローを測定して衝突領域の幾何学的形状を求  
め、それによって事象を選別する。これによって、方位角に依存した、生成物質の「厚み」を精密  
に決定することができ、放出粒子と物質との相互作用を定量的に議論することができるように  
なっている。この解析では事象を方位角という軸で整理することになるため、非常な高統計が必要  
になる。すなわち、J-PARC-HI の高輝度ビームがあってこそ本領を発揮できる測定方法である。

これらの実験を遂行するためには、検出器側にも格段の進歩が求められる。ゆらぎ測定や高度  
な事象選択においては、より広い立体角を覆う高い検出効率の検出器が必要とされる。また、大  
強度ビームの特性を最大限に活用するためには高い反応レートでの事象発生を捉えるための反応  
速度が必要である。これらの要求に応えるための検出器の設計については、第 4 章で述べる。

## 2.2 ハドロンのストレンジネス核物理

我々の世界の物質が何から構成され、それがどのように形作られてきたかを追究した結果、陽  
子や中性子（ハドロン）がクォークから作られていることが判明し、その振る舞いを記述する量  
子色力学（QCD）が誕生した。QCD は、高エネルギーの摂動論的領域においてその正しさが確

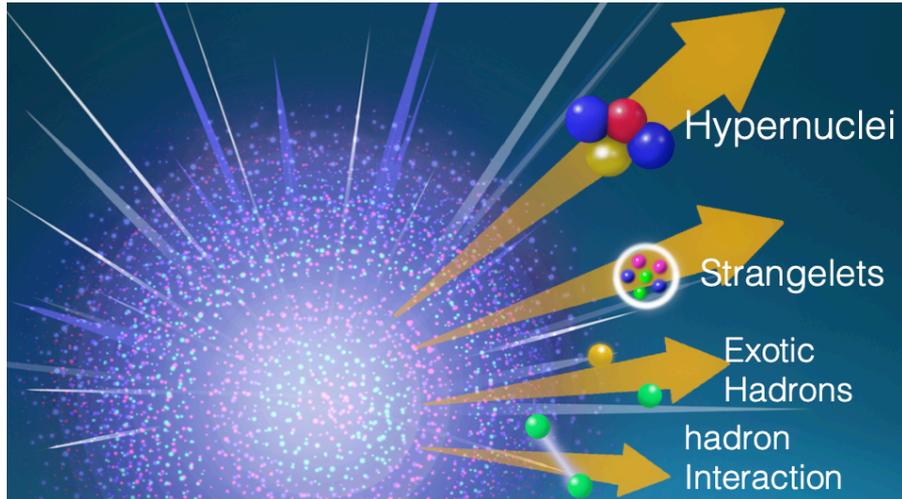


図3 J-PARC-HI が実現するハイパー核・エキゾチック粒子の研究

かめられている。しかし低エネルギーの非摂動領域で QCD を解くことが困難なため、クォークからハドロン、ハドロンから原子核が生まれて我々の物質世界が作られた仕組みを、QCD に立脚して理解することは難しい。

ハドロンの成り立ちを理解するためには、ハドロン励起状態のスペクトルの全貌を調べること（ハドロン分光）と、4つ以上のクォークで構造される、あるいはグルーオンの自由度をもつ、エキゾチックハドロンを探索することが重要である。ハドロン分光では、まだ十分に実験データの得られていない  $\Xi$  と  $\Omega$  の励起スペクトルの測定が望まれる。また、ペンタクォークやダイバリオン、ストレンジレット（s クォークを含む多クォーククラスター）など、バリオン数 1 以上のエキゾチックハドロン（s や c クォークを含む）の探索が必要である。これらの研究には、s クォークを豊富に作る 10 AGeV 程度のエネルギーの重イオン衝突実験がとくに有効であり、崩壊様式や収量などからその構造を明らかにすることが期待される。

一方、原子核の理解の基本となる核力については、その遠距離部分は中間子交換描像で理解できるものの、クォークの自由度が現れる短距離部分を理解することは難しい。ここで、s クォークを含むバリオン間力（ハイペロン・核子、ハイペロン・ハイペロン相互作用）を調べることで、その理解の手がかりが得られる。中性子星内部の高密度物質の理解や、Lattice QCD によるバリオン間力の計算を検証するためにも、ハイペロンを含むバリオン間力のデータが不可欠である。重イオン衝突によって生成する軽いハイパー核の束縛エネルギーや寿命のデータから、 $\Lambda N$ ,  $\Lambda\Lambda$ ,  $\Xi N$  相互作用（ $\Lambda N$ - $\Sigma N$ ,  $\Lambda\Lambda$ - $\Xi N$  相互作用を含む）の情報が得られる、さまざまなバリオン間力の理論モデルと J-PARC ハドロン実験施設や JLab で進みつつある  $\Sigma p$ ,  $\Lambda p$  散乱実験のデータを用い、少数厳密計算を駆使することで、ハイパー核データから、ハイペロンを含んだ（三体力の効果も含めた）バリオン間相互作用の定量的な理解が進み、中性子星内部の高密度物質の理解につながる。

### 2.2.1 ハイパー核とエキゾチック粒子の研究

数 AGeV 以上のエネルギーの重イオンビームを用いると、ハイペロン ( $\Lambda$ ,  $\Sigma$ ,  $\Xi$ ,  $\Omega$ ) や、これらが原子核に束縛したハイパー核、すなわちストレンジネスを含むバリオン (系) が豊富に生成される。特に、原子核衝突の participant 領域で発生したハイペロンや  $\pi$  中間子などが spectator 領域の核 (フラグメント) にトラップされ、あるいはそこで反応を起こすことで、ビームとほぼ同じラピディティをもつ様々なハイパー核が生成される。GSI の HypHI 実験では、 ${}^6\text{Li}$  ビームを  ${}^{12}\text{C}$  標的に照射して、 ${}^3_{\Lambda}\text{H}$ ,  ${}^4_{\Lambda}\text{H}$  ハイパー核の生成を観測した。従来、ハイパー核研究では、 $K^-$ ,  $\pi^\pm$  ビームや電子ビームを用いた直接反応によってハイパー核分光研究が行われてきたが、これらの方法では生成できるハイパー核の種類が限られ、陽子数/中性子数比が標的核から大きく離れた陽子・中性子過剰ハイパー核や、ストレンジネスを 3 つ以上含むハイパー核の生成は困難である。一方、重イオンビームを使う方法では、原理的にはさまざまなハイパー核の生成が可能である。

生成したハイパー核が弱崩壊する場合、200 ps 程度の寿命をもつため、10 AGeV 程度のビームラピディティでは崩壊点が生成点より 0.7 m 程度下流になるため、明確にハイパー崩壊事象を同定できるだけでなく、強い磁場をかけて崩壊前に  $Z/A$  ごとにハイパー核を分離したり、磁気モーメントを測定することが可能となる。 ${}^6_{\Lambda}\text{H}$ ,  ${}^9_{\Lambda}\text{He}$ ,  ${}^{12}_{\Lambda}\text{Li}$ ,  ${}^4_{\Lambda\Lambda}\text{H}$ ,  ${}^5_{\Lambda\Lambda}\text{H}$  などの中性子過剰の  $\Lambda$ ,  $\Lambda\Lambda$  ハイパー核や、負電荷の  $\Xi^-$  核\*2 は、通常核のフラグメントや核子、中間子の大量のバックグラウンドから明確に分離することができる。例えば、 $\Omega^-\Omega^-$  は Lattice QCD 計算で束縛することが予想されているが、これは弱崩壊ししない  $Q/A = -2$  の粒子であることから、生成断面積は極めて低いものの、この方法で容易にバックグラウンドから選別して同定することができる。

そこで、図 13 のように、強い磁場で特定の  $Z/A$  をもつものだけを分離してから、その崩壊を測定する "Closed Geometry" のセットアップを提案する。測定器領域にはバックグラウンド粒子が到達しないのでビーム強度の制限はほとんどなく、J-PARC-HI の大強度ビームの恩恵をフルに受けることができる。この方法によって、図 14 のように、上に示したような様々なハイパー核を水平方向に分離できる。この方法で、電荷が中性または中性に近い準安定な (弱崩壊ししない) エキゾチックな粒子 (H ダイバリオンや strangelet,  $\Lambda nn$  束縛状態など) を探索することもできる。(中性粒子の場合は、中性子のバックグラウンドがあるので下流の検出器では超前方を避ける工夫が必要である。)

さらには、ビーム速度を持つハイパー核やエキゾチック粒子を「ビーム」として用いて、それらの反応断面積からそのハイパー核のサイズを測定したり、磁場で歳差運動をさせて磁気モーメントを測定することができる。中性子過剰ハイパー核や  ${}^3_{\Lambda}\text{H}$  では、一部中性子や  $\Lambda$  が空間的に大きく広がったハロー構造をもつと予想されており、その大きさを直接測定することができる。一方、バリオンの構造が核媒質中で変化することで、核内バリオンの磁気モーメントが変化する可能性があるが、核子からのパウリ効果を受けないハイペロンが  $0s$  軌道に入ったハイパー核基底

\*2 通常の  $\Xi$  核は強い相互作用で  $\Xi^-p \rightarrow \Lambda\Lambda$  に転換するが、 $\Xi^-n$ ,  $\Xi^-nn$  核は (もし束縛すれば) weak decay ししない。

状態の磁気モーメントを直接測定することでそれが明らかになると期待される。特に二重閉殻の ${}^4\text{He}$ に $\Lambda$ が束縛した ${}^5_{\Lambda}\text{He}$ は、核内のバリオンの性質変化を見るのに適しており、重イオン衝突での生成断面積が大きいと予想されていることもあって、磁気モーメントの1パーセントオーダーの高精度測定が可能である。

## 2.2.2 粒子相関によるハドロン間力の測定

一方で、“Open Geometry”の検出器において、衝突事象に含まれる2つのバリオンの運動量相関を測定することでさまざまなYN, YY相互作用の(低エネルギーでの)情報が得られる。実際、ALICEのデータを用いて、バリオン相関によって $\Lambda\Lambda$ ,  $\Xi^-p$ などの相互作用の情報が得られている。大強度ビームを用いることで、散乱実験やハイパー核実験ではアクセスすることが難しい、 $\Omega^-N$ 間、 $\Lambda\Sigma$ 間、 $\Sigma\Sigma$ 間、 $\Lambda\Sigma$ 間などの相互作用も調べることができる。とくに、 $\Omega^-p(\text{spin}=2)$ は引力が強く束縛状態になることがLattice QCD計算で予想されており、相関の測定だけでなく束縛状態を発見することもできる。さらには、 $K$ 中間子とバリオン(陽子やハイペロン)との相関も測定可能である。

## 2.3 QCDの励起状態の測定

ハドロンは、強い相互作用をする“真空”からの励起状態と考えられ、ハドロンの持つ性質は“真空”の性質を強く反映している。従って、様々な温度あるいは密度を持つ媒質中でのハドロンの性質の測定を通じて、強い相互作用をつかさどるQCDの相構造を理解することができる。ところで、RHICやLHCなどの高温状態と違って、性質の変化がより早く起こりやすい有限密度を持つ媒質の研究は、格子QCD計算による第一原理計算が難しく、観測・実験による研究が重要視される分野である。J-PARC-HIで実現可能な10 AGeV程度のエネルギーにおける原子核衝突では、原子核密度をはるかに超える高密度媒質が生成され、そのような極限的な環境でハドロンの質量等を測定することで、相構造について系統的な研究が展開されることが期待される。J-PARC-HIでは、様々な大きさのイオン衝突実験をエネルギーを変えて行うことができるので、QCD相図の温度、密度の広い領域においてハドロン質量を系統的に、かつ高統計で調べることができる。

最も確実に重要な測定の一つは、ベクター中間子の質量分布の測定である。既に原子核密度や高温媒質での測定が進められているが、原子核密度を超える高密度下での測定は存在しない。なぜなら、過去にAGSで同エネルギーでの重イオン衝突実験が行われたが、レプトン対の測定が行われなかったからである。したがって、このエネルギーで、レプトン対の測定を行うことは、大変重要である。また、ベクター中間子の質量分布を高統計で測定することで、媒質中のクォーク・反クォーク凝縮量の評価が可能となる。この凝縮量はカイラル対称性の破れの秩序変数であり、その密度依存性の測定から、強い相互作用をする媒質の相転移現象をとらえる。また、カイラル対称性の回復現象を定量的に議論するためには、究極的にはベクター中間子と、そのカイラルパートナーである軸性ベクター中間子の質量を測定することが重要である。カイラルパートナーとは、

スピンの同じでパリティの違う粒子であり、対称性が回復した状態では、同じ準位を持つことが理論から予想されているからである。この縮退現象を世界で初めて検証することも目指している。

さらに、カイラル対称性の自発的な破れに伴って生じる南部-ゴールドストーンボソンである擬スカラー粒子の測定も考えられる。原子核密度中では、 $\pi$  中間子や  $\eta$  中間子、 $\eta'$  中間子の束縛エネルギーの測定によるカイラル対称性の回復状態の研究が精力的に行われている。重イオン衝突においては、RHIC における PHENIX 実験で  $\eta$  中間子の質量変化が示唆されたように、二粒子相関から擬スカラー粒子に関する測定を進めることが可能である。特に、 $\eta'$  中間子に関しては有限密度中での大きな変化が期待されている。

最終的には、カイラル対称性の破れに対して本質的に重要なスカラー中間子である  $\sigma$  中間子の原子核内での性質の測定を目指す。 $\sigma$  中間子も幅が広いなどの理由で直接の同定が難しい。そこで 2 個の  $\pi$  中間子への崩壊の閾値付近での収量の増加を含む質量分布の変化を捉えることが提案されている。この実験を現実化するのには挑戦的であるが、J-PARC における大強度ビームを用いて測定する。

一方、近年発見された  $X, Y, Z$  あるいは  $P_c$  といったエキゾチックハドロンについては、その構造に大きな関心が集まっており、特に 4 つや 5 つのクォークが 1 か所に集まったマルチクォーク的なものか、ハドロン分子的になっているのかが議論となっている。また、 $\Lambda(1405)$  については、 $K^-$  と陽子の束縛状態に近い構造との示唆がある。こうしたエキゾチックハドロンを原子核衝突で生成し、さまざまな密度の核物質中でのこれらの生成・崩壊を情報を得ることで、これらの構造について新たな理解が進むものと期待される。

## 2.4 リニアックを利用する物理

J-PARC-HI 計画の入射器（リニアック）では  $^{238}\text{U}$  までのさまざまなイオンビームが、最大 20 AMeV のエネルギー、1 pA 程度の大強度で得られる。このビームを用いると、これまで原子力機構のタンデム加速器 (20 MV) で進められてきた様々な研究を大幅に進展させることができる。とくに、超重元素を合成してその特異な化学的性質を調べる研究や、より中性子数の多い重・超重原子核を合成する研究を目指す。

これまでに原子力機構先端基礎研究センターのグループは、ローレンシウム (Lr) など重アクチノイド元素の第一イオン化ポテンシャルの測定を行い、電子の相対論的効果が現れること、またアクチノイド系列が (Lr) で終端することを示すなど、顕著な成果を挙げてきた。さらに重い超重元素領域では、電子軌道がさらに大きく変化を受け、周期表での元素の位置に修正が迫られるはずである。J-PARC-HI の大強度入射器があれば、このような超重元素の電子軌道を明らかにすることができ、人類の元素に対する知見を広めることができる。

一方、超重元素領域における原子核についても未解決な問題がある。核図表における“安定の島”は、中性子数 184, 陽子数 114, 120 に位置するが、これら原子核は中性子数が多いため、cold fusion や hot fusion といった従来の核融合反応では、どのようなビーム種と標的核を組み合わせても合成することはできない。これに対し、 $^{238}\text{U} + ^{248}\text{Cm}$  といった重い原子核同士の多核子移行

反応を用いれば、これらの生成が可能となる。この周辺には寿命が極めて長い（数十年オーダーの）超重核の存在も予想されており、原子核に対する我々の理解を大きく変える。J-PARC-HI のリニアックでは、直径 1 mm 程度のビームが得られるので、微量しか得られない Cf や Es といったアクチノイド標的が使えるメリットもある。Z=119, 120 といった新元素の合成をめざす理研とは相補的な、「安定の島」探索の研究が J-PARC で大きく進展することとなる。

J-PARC-HI は、こうした大強度の低エネルギーイオンビームを用いた研究においても世界を先導する力をもっている。

### 3 J-PARC における重イオン加速

大強度陽子加速器施設 J-PARC(図 4) は、400MeV 負水素リニアック、3GeV シンクロトロン (RCS)、50GeV 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・ミュー粒子を生成する物質生命科学実験施設 (MLF) へ供給され、数秒に数パルスのみ 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 (現在、設計最高エネルギー:50GeV) 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)、もしくは徐々に射出する遅い取り出しでハドロン実験施設 (HD) に供給される。本提案書で提案する J-PARC 重イオン加速計画では、図 4 中の赤色で示す重イオン入射器を新設し、現存する RCS と MR を活用し、核子当たりの重心系エネルギーで GeV 級まで加速する。そして、HD 実験施設へ大強度重イオンビームを供給し、高密度核物質の実験を行う事を計画している。

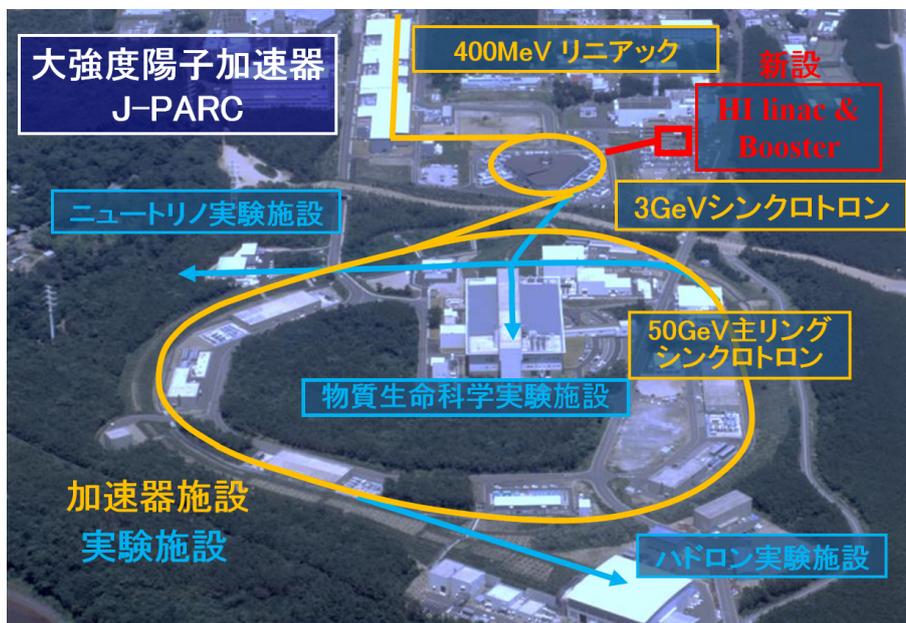


図4 大強度陽子加速器施設 J-PARC:3 つの加速器施設 (橙色)、3 つの実験施設 (水色)、新設予定の重イオン入射器 (赤色)

#### 3.1 J-PARC 陽子加速器の現状

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表 1 に示す。リニアックと RCS では、2018 年 7 月 3 日に MLF 施設へ所期目標である世界最高レベルの 1MW 出力の 1 時間安定

運転に成功し、安定な大強度出力の実績を有する。今後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 500kW から 1MW へ徐々に上げていく。加速器としては更なる大強度出力 1.5MW に向けて研究開発を進めている。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 484kW 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 750kW 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、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、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。

表1 J-PARC 加速器の陽子ビームの所期目標と実績.

リニアック (400 MeV)	目標	実績
ピーク電流/パルス長	50mA/0.5ms	50mA/0.5ms
RCS(3 GeV)	目標	実績
MLF: 出力/粒子数/繰返し	1MW/8.3 × 10 <sup>13</sup> 個/25Hz	1MW/8.4 × 10 <sup>13</sup> 個/25Hz
MR(現在 30 GeV)	目標	実績
NU: 出力/粒子数/繰返し	750 kW/2.0 × 10 <sup>14</sup> 個/1.3s	484 kW/2.5 × 10 <sup>14</sup> 個/2.48s
HD: 出力/粒子数/繰返し	100 kW/1.1 × 10 <sup>14</sup> 個/5.2s	51 kW/5.5 × 10 <sup>13</sup> 個/5.2s

### 3.2 J-PARC における重イオン加速スキーム

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、陽子ビーム加速との違いを考慮しなければならない。陽子ビームと重イオンビーム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ビーム損失

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。しかしながら、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として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 周分入射する、つまりキッカー電磁石を 2 台のみ配置する事で上記 2 を克服できる。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。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、世界記録の一桁高い  $10^{11}$  個の重イオン粒子数でもシミュレーション上は大きなビームロスなく加速可能である。

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表 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  $4.0 \times 10^{11}$  ppp 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。

現在、MR では陽子ビームを 30GeV のエネルギーまで加速し、実験施設に供給しており、その電磁石磁場を想定すると 11.06 AGeV (U イオン) となる。理論研究で予言されている QCD 相転移の臨界点や一次境界の探索にさらなる高エネルギーが必要な場合、ドイツ GSI・FAIR 計画の SIS300 加速器 (現行計画の SIS100 加速器の約 3 倍のエネルギーまで加速) の新規建設 (500 億円程度) と同様に、本計画でも MR の設計最高エネルギー 50GeV 相当の 18.78 AGeV へのアップグレードの本格検討が必要となる。MR の場合には、FAIR 計画とは異なり、リング周長も主電磁石も現行のまま、電磁石電源の供給電流増強が主になると考えている。

表2 J-PARC 重イオン加速スキーム (U イオン).

加速器	イオン	入射 / 出射エネルギー	粒子数
HI リニアック	U <sup>35+</sup>	- / 20 AMeV	$2.0 \times 10^{11}$ ppp
HI ブースター	U <sup>66+</sup>	20 / 67 AMeV	$1.5 \times 10^{11}$ ppp
RCS	U <sup>86+</sup>	62 / 735 AMeV	$1.1 \times 10^{11}$ ppp
MR	U <sup>92+</sup>	0.73 / 11.06 AGeV	$4.0 \times 10^{11}$ ppp

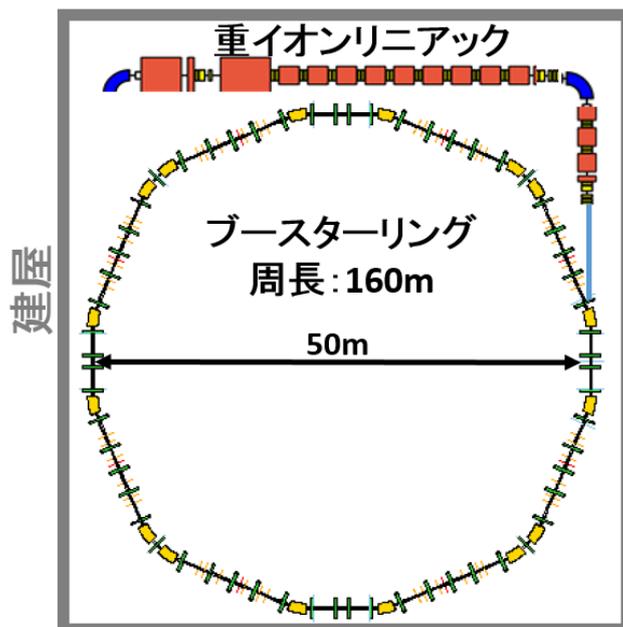


図5 新設予定の重イオン入射器施設

### 3.3 J-PARC における重イオン入射器の新設

本計画では、図 4中の赤色で示す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。入射器の概要を図 5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、図 4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る。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。また、高電荷にすることで残留ガスによる電子剥離を抑える。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。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。空間電荷効果とは、ビーム内の粒子間の反発力でビームが広がると認識している方がいるが、反発力にて収束磁場が弱められることにより生じる、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、ビームが拡がり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。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図 6 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、その結果実績のある RCS の入射時と比較し、約 3/4 となる。つまり、図 6 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。

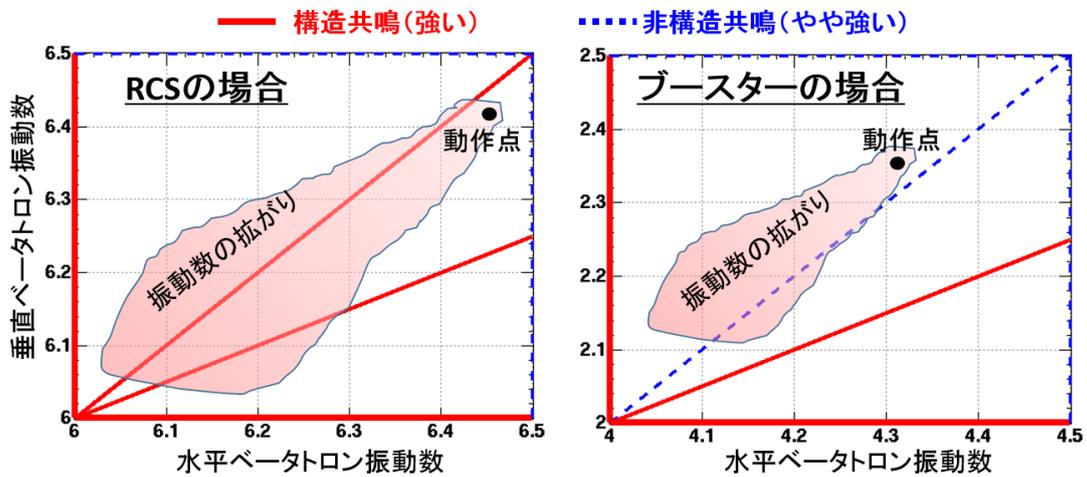


図6 RCS(左)とブースター(右)での横方向振動数マップにおける共鳴線と振動数拡がりの比較

### 3.4 J-PARC における重イオン加速のまとめ

本章で述べてきた J-PARC における重イオン加速計画に関して粒子数や衝突レートで競合するドイツ GSI・FAIR 計画と比較すると

1. 一桁低い予算規模 (2000 億円に対し 150 億円)
2. 一桁高いビーム強度 ( $>10^{10}$  個に対し  $>10^{11}$ )
3. 世界最高レベルの取り出し効率 (70% に対し 99.5%)
4. 大強度化の早期実現性 (後段に大型加速器建設中に対し前段の入射器のみ)

となり、J-PARC における重イオン加速計画は、陽子ビームで 10 年かけて培われてきた大強度実績 (陽子: $10^{14}$  個)、世界最高レベル 99.5% の遅い取り出し効率、世界に誇るビームシミュレーションや調整技術を有する既存の加速器施設や人的資源を最大限に活用することで熾烈な国際競争の中で国際的有意性が非常に高い大型研究計画と言える。

## 4 実験計画

J-PARC-HI における重イオン衝突実験は、ハドロン実験施設において行う予定である。重イオンビームは、陽子ビームと同様に、MR から遅い取り出し方式で取り出され、一次陽子ビームライン（高運動量ビームライン）によってハドロン実験施設に輸送される。高運動量ビームラインは 2019 年に完成予定であり、2020 年 1 月に最初の陽子ビームを用いたレプトン対測定実験 (E16) が開始される。

重イオン衝突実験は、以下のように段階的に進める戦略をとる。なお、J-PARC-HI とハドロン拡張計画の進展に応じて最適化する。

1. 高運動量ビームラインの E16 実験スペクトロメーターのアップグレードによる陽子ビーム、重イオンビームを用いた J-PARC-HI 先駆実験（重イオンビームレート  $\sim 10^5$  Hz まで）
2. 高運動量ビームラインをハドロン拡張エリアに延伸し、新スペクトロメーターを建設して行う、J-PARC-HI 本実験（重イオンビームレート  $\sim 10^6$  Hz 以上）

1. の J-PARC-HI 先駆実験においては、2. の本実験を視野に入れた検出器の開発・試験を行うとともに、最初の重イオン衝突実験を行う。本提案書では、本実験の検出器 R&D を含む先駆実験の検出器建設やビームライン・遮蔽体の整備等の予算を要求する。2. に関しては、ハドロン拡張計画の進展に応じて様々な状況に対応する。

### 4.1 E16 実験アップグレードによる J-PARC-HI 先駆実験

J-PARC E16 実験は、J-PARC-HI に先駆け、陽子・原子核反応において  $\phi$  等の軽いベクター中間子から崩壊するレプトン対の測定を行い、原子核密度下でのスペクトル変化を検証する実験であり、2020 年 1 月から開始予定である。J-PARC-HI では極限に近い高密度物質でのレプトン対測定が可能になることから、密度依存性についての系統的な研究展開が期待される。実験技術的にも共通点が多く、特に、J-PARC-HI と同じ高運動量ビームラインにおいて  $10^{10}$ /spill の高レートの陽子ビームを用いるため、J-PARC-HI の様々な高耐レート検出器の試験を行うことが可能である。そのうち、J-PARC-HI のための高時間分解能の飛行時間測定器（MRPC-TOF (Multi-gap Resistive Plate Chamber Time-of-Flight counter)）の開発を既に行っており、これを 2020 年より開始される E16 実験に導入して、さらにハドロン測定を行う計画を進めている。これによって電子対測定と相補的な、 $\phi \rightarrow K^+K^-$  崩壊の測定等を目指す。

さらに E16 スペクトロメーターをアップグレードして、重イオン加速器立ち上げ直後の低レート重イオンビームを用いた電子対、ハドロン等を測定する実験計画（J-PARC-HI 先駆実験）の検討を始めている。

重イオン衝突においては、陽子・原子核衝突に比べて多数の粒子が発生するため、図 7 のよう

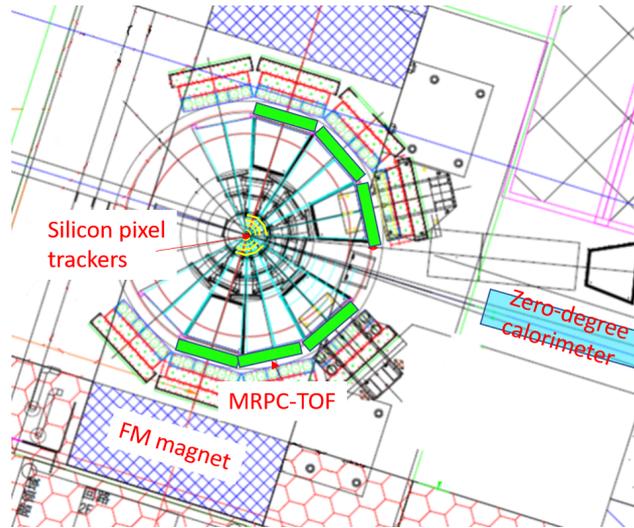


図7 J-PARC-HI 先駆実験のための E16 実験のアップグレード。

に、MRPC-TOF に加え、細密セグメントを持ち、高計測率の飛跡検出器（シリコンピクセル検出器）、及び重イオン衝突の衝突係数の測定のためのゼロ度カロリメーター等を開発し、重イオンビーム実現（2025 年）までに段階的に E16 実験に導入し、重イオン衝突実験に向けた陽子・原子核衝突における粒子生成の理解と検出器技術の向上を行っていく。

この先駆実験においては、比較的低ビームレート（ $\leq 10^5$  Hz）における軽イオン、重イオン衝突実験が可能となる。測定可能な粒子は、ハドロン、電子対、光子等である。各種ハドロン、特に  $\Lambda$  ハイペロンや  $K$  中間子等のストレンジネス生成の運動量スペクトル、2 次までのフロー等に関しては詳細な物理解析が可能な統計が得られる。より高統計が必要な電子対生成（ $\rho, \omega, \phi$  の生成）、4 次までの揺らぎについても基礎的な物理解析が可能である。特に  $\phi$  の測定は、E16 よりも高温・高密度におけるスペクトル変化を E16 と同様の実験装置で測定することができるため、系統的な研究が可能である。

## 4.2 J-PARC-HI 本実験

J-PARC-HI の本実験が可能になるためには、ハドロン実験施設拡張計画の実現が必要で、さらに、大型科研費を含む各大学の実験装置への投資が必要である。ここでの本実験は、それらの条件が可能になった時点での計画である。一方、ハドロン拡張が実現していない場合にも、現ハドロン実験施設の高運動量ビームラインの下流にアネックス建屋を建設し、本実験用のスペースを作るという方法も検討している。この場合、高運動量ビームラインの延伸は必要ない。この本実験については、J-PARC-HI 先駆実験において 3 年程度の期間様々な測定器技術の検証を行い、基礎データを測定したのち、実験の開始を目指す。

J-PARC-HI の重イオン衝突実験においては、1 章で示した高密度物質、ストレンジネス・ハドロン物理の目標を達成するため、荷電ハドロンとレプトン等を高計数率で測定する必要がある。これらの測定においては、1 AGeV から 11 AGeV までの広範囲のビームエネルギーにおける測

定を行い、温度・密度を変え、相図の広い範囲における測定を行うことが相構造の探索のためには非常に重要である。固定標的実験においては低エネルギーの測定では後方角のアクセプタンスが必要である。また、揺らぎの測定においてはアクセプタンス依存性を見ることが重要であり、低ビームエネルギーにおける粒子測定のためには、大立体角であることが有利である。これらの要求を満たすために必要な検出器の性能は以下の通りである。

- 細密セグメント、耐高計数率の検出器
- 大立体角のスペクトロメーター
- 粒子の識別（荷電ハドロン、レプトン、光子等）

これらの性能を満たすスペクトロメーターの一例として大型超電導ダイポール磁石に基づくスペクトロメーターを検討した。このスペクトロメーターを用いて、検出器の組み合わせを変更することにより、ビームレートの増強に応じて以下のように段階的にハドロン、ミュオン、ハイパー核の測定を行うことができる。

1. ハドロンスペクトロメーター ( $10^6$  Hz まで)
2. ミュオンスペクトロメーター ( $10^7$  Hz まで)
3. ハイパー核スペクトロメーター ( $10^9$  Hz まで)

また、上記の3種類のスペクトロメーターのうち複数建設し、ビームラインに直列に置くオプションも考えられる（例えばハドロンスペクトロメーターを上流に、ミュオンスペクトロメーターを下流に設置）。この場合複数の実験を同時に行うことが可能となり、下流のスペクトロメーターについて、コストを低減するために立体角を制限したり、電子や光子測定等に特化したスペクトロメーターにするオプションも考えられる。そのようにすることで実験の自由度が上がり、海外からのコラボレーション等も参入しやすくなる可能性がある。

図 11 のハドロンスペクトロメーターでは、磁場中に置かれた前方角 ( $< 4^\circ$ ) を覆うシリコンピクセル検出器 (STP) と後方角を覆う Time Projection Chamber (TPC) の組み合わせによって高レートの荷電粒子の飛跡を再構成する。測定した運動量と、飛行時間測定器 (TOF) で測定した飛行時間または TPC で測定したエネルギー損失から、陽子、 $\pi$ 、 $K$  等の荷電粒子の粒子識別を行う。スペクトロメーターの性能を評価するため、JAM カスケードモデルで生成した 10 AGeV/c の U+U 衝突事象を入力として検出器シミュレーションを行った。図 8 は、陽子のラピディティと横運動量のアクセプタンスを示す。陽子、 $\pi$ 、 $K$  については全立体角に対して 80% 程度のアクセプタンスを達成している。図 5, 10 は、それぞれ TOF による飛行時間から求めた質量、TPC 内のエネルギー損失と運動量による粒子識別性能を示す。陽子、 $\pi$ 、 $K$  が明確に識別できていることが示されている。粒子のレートについては、TPC のアクセプタンス内で、1 MHz の U ビームと U 標的の衝突で、 $50 \text{ kHz/cm}^2$ 、最上流（標的から 8 cm）の SPT 内で  $100 \text{ MHz/cm}^2$  と見積もられており、それぞれの検出器でこのレートにおける測定は可能である。SPT については ALICE 実験の Inner Tracking System (ITS) の耐レート性能 ( $100 \text{ MHz/cm}^2$ ) を想定している。

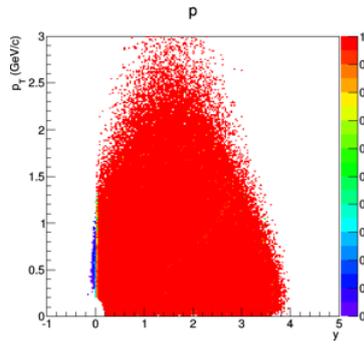


図8 陽子の rapidity と横運動量のアクセプタンス。

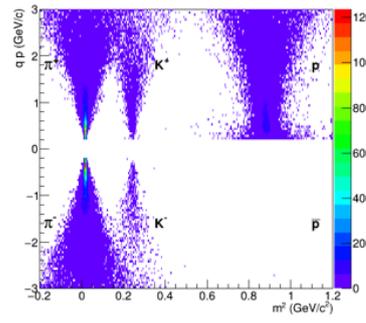


図9 飛行時間から求めた質量の二乗と、運動量による荷電粒子の識別性能。

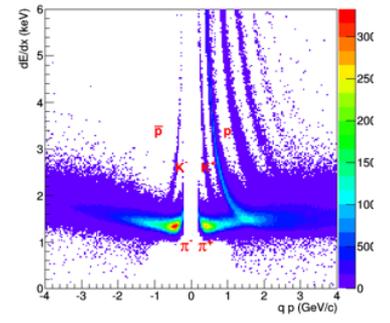


図10 運動量と TPC 内のエネルギー損失による荷電粒子の識別性能。

図 12のミュオン対測定用セットアップでは、ハドロンスペクトロメーターにおいて、TPC をハドロン吸収体とトラック（GEM トラック等）から構成されるミュオントラックに置き換える。ダイミュオントリガーにより、事象数を 3/100 程度に減らすことが可能である。ALICE ITS 相当の最上流の SPT を標的から 24 cm の距離に離すことにより、 $10^7$  Hz までの重イオン衝突に対応可能である。

さらに、図 13では、ハドロンスペクトロメーターの上流に強力な sweeping 磁石を設置し、その直後にコリメーターを置くことによって、荷電粒子のほとんどをコリメーターで止め、中性に近いビームフラグメントとビーム粒子のみを通過させる。通過したビームフラグメントの中から、ハイパー核の弱崩壊事象を探索する。TPC の中心に穴が開いているため、TPC ではビームフラグメントやビームの検出を抑えられ、 $10^8$  Hz の反応レートまでの実験が可能である。図 14のようにこのスペクトロメーターでは強いダイポール磁場により様々なハイパー核が分離可能となる。特に中性電荷をもつ  $\Lambda_{nn}$ 、負電荷の  $\Xi_{nn}$  等は、バックグラウンドの粒子が比較的少なく、またもし検出できれば初めての中性、負電荷の原子核の発見となる。

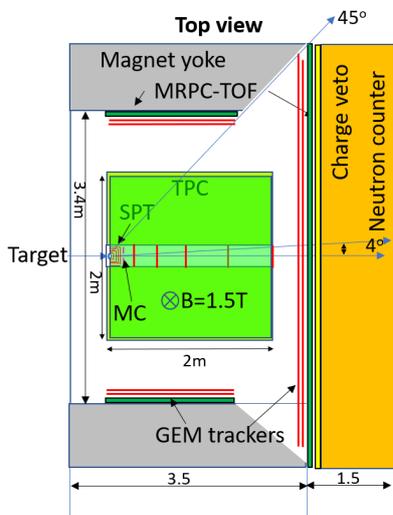


図11 ハドロンスペクトロメーター

ZCAL

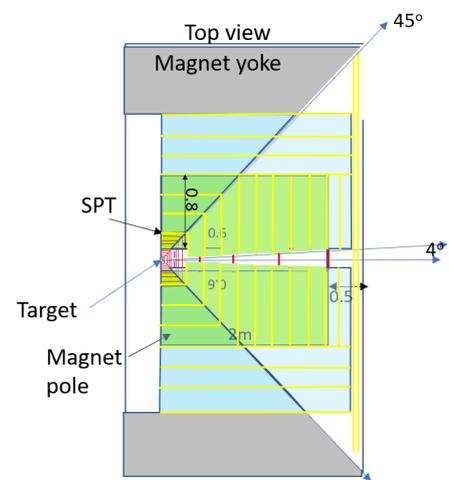


図12 ミュオンスペクトロメーター

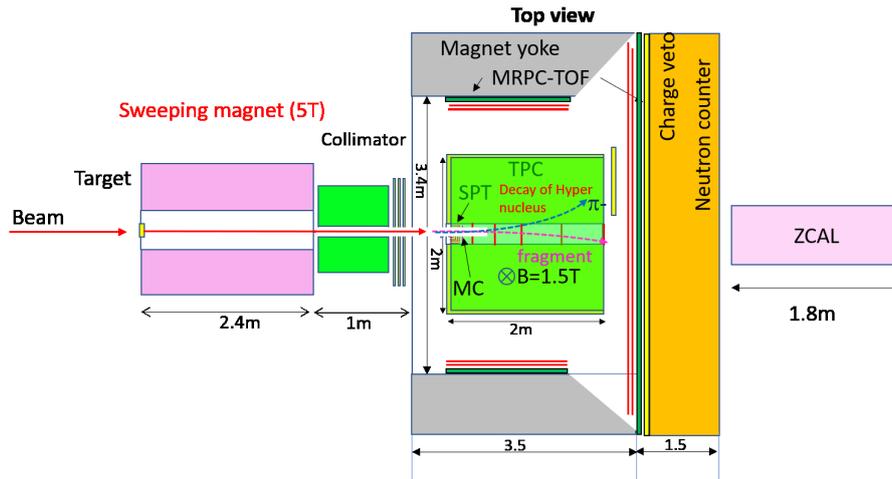


図13 ハイパー核スペクトロメーター

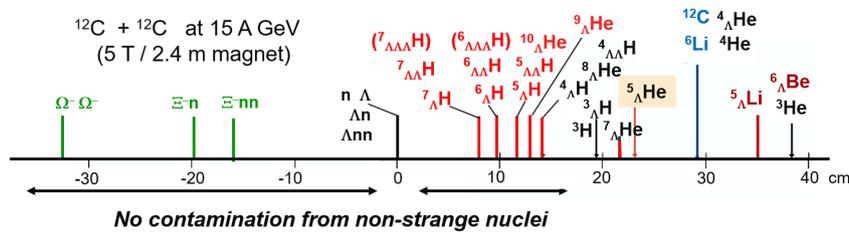


図14 ハイパー核スペクトロメーターにおけるハイパー核の水平位置への分離。

これらの3種類のスペクトロメーターの検出器配置において衝突径数を測定するため、ゼロ度カロリメーター（鉄・プラスチックシンチレーターサンドイッチ型カロリメータ等）と標的直後に粒子多重度測定器（シリコンピクセル検出器等）を設置する。

これらの高レート計測のための鍵となる技術として、シリコンピクセル検出器、トリガーを用いない連続データ読み出し・オンライン飛跡再構成・事象選択が必要である。前者についてはALICE実験のMAPS技術に基づくシリコンピクセル検出器、後者についてはALICE Online Offline Computing (ALICE-O2)等の技術を参考にして開発して行く予定である。

### 4.3 ビームラインと実験エリア

J-PARC-HI 実験では、現在建設中の高運動量ビームラインに重イオンビームを輸送し、固定標的型実験を行う。J-PARC-HI のスペクトロメーターには 15 m（ビーム方向）× 7 m（水平方向）× 7 m（高さ）程度のスペースを必要とする。ハドロン施設拡張案の一つとして図 15 のようなレイアウトが考えられているが、この案では高運動量ビームラインを拡張エリア内まで延伸し、そのスペースをスペクトロメーターの設置場所として検討している。E16 実験の  $10^{10}/\text{spill}$  の陽子ビームに対してビームダンプ、放射線遮蔽体等を強化する必要がある、現在それらの検討を行っている。

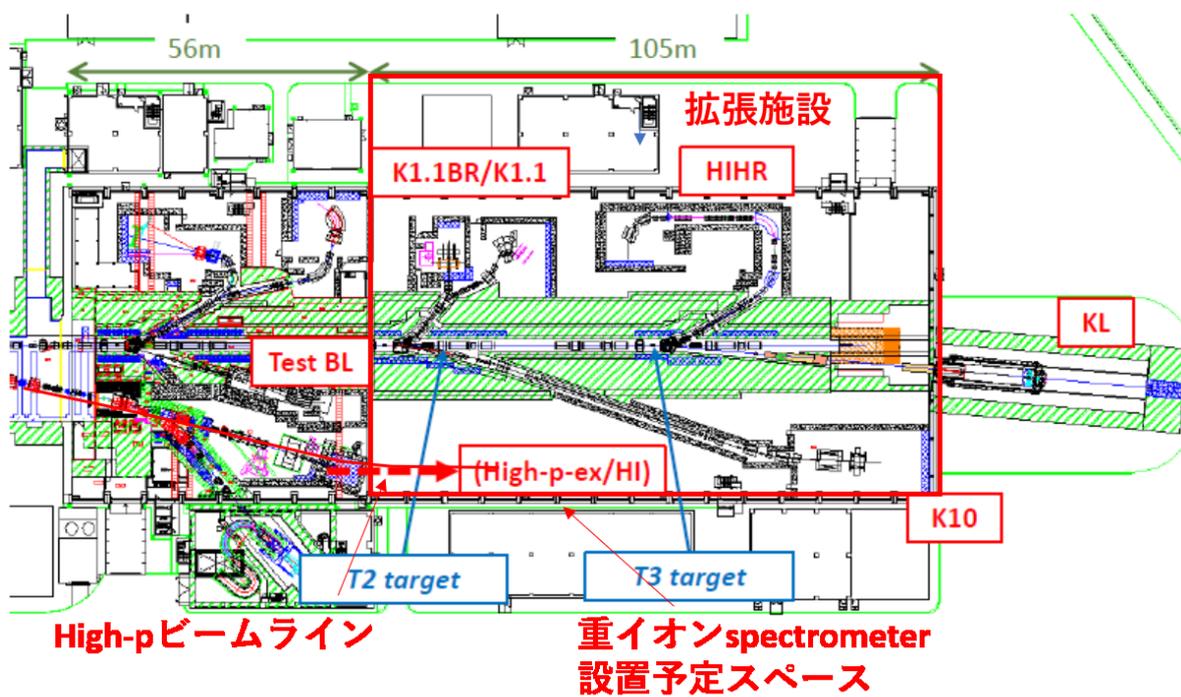


図15 ハドロン実験施設における高運動量 (High-p) ビームラインと J-PARC-HI スペクトロメーター設置場所の候補。

## 5 組織体制、概算コスト、スケジュール

### 5.1 組織体制

本計画の重イオン加速器は、J-PARC（原子力機構）が中心となって建設を行う。設計・開発については大強度陽子ビーム加速の実績を持つ J-PARC の加速器研究者を中心として、原子力機構タンDEM加速器施設で安定な重イオンビームを供給している加速器研究者と共に主導して実施する。

ハドロン実験施設における重イオンを輸送するビームラインや放射線遮蔽、ビームダンプ等の基盤設備の整備に関しては、J-PARC（KEK）の主導の下、原子力機構先端基礎研究センターと共に実施する。さらに、マスタープラン 2017 の重点大型研究計画として既に採択されている「J-PARC 実験施設の高度化による物質の起源の解明」におけるハドロン実験施設拡張計画に併せて、実験設備の拡張も実施する。

本計画の実験研究においては、原子力機構先端基礎研究センターと筑波大学が連携して研究計画、実験装置建設、実験グループを統括し、J-PARC 実験審査委員会における実験採択を経て実施する。長年 RHIC、LHC において重イオン衝突実験の国際共同研究を主導的に行ってきた高エネルギー重イオン研究グループと、J-PARC において世界最高レベルの高レートビームによってストレンジネス・ハドロン実験研究を行ってきた研究グループの共同研究開発体制の下、実験装置の開発と設計と建設を分担し、実験を推進する。実験提案から結果に対する迅速な物理解釈には理論的研究が必須である。そのため、高温・高密度 QCD 研究、ハドロン研究、ストレンジネス研究を専門とする理論研究グループと密接に連携し、J-PARC エネルギーにおける重イオン衝突動的モデルの開発等によって実験研究を強く支え、世界をリードする。本研究は、ハドロン研究者と重イオン衝突研究者が共同して挑戦的な物理研究に臨む大型プロジェクトであり、新たな原子核・ハドロン物理研究の扉を開くものである。さらに、長年重イオン研究グループが主導して国際共同研究を実施してきたように、実験装置等の開発と建設においては国際協力体制を整え、海外研究機関の分担の下、実施する。特に高レート粒子測定技術に関する最先端の技術を有する LHC 等の実験グループとの共同研究に既に参加しており、密接な協力の下、実施する。

以上のように、本研究計画は、世界に誇る大強度陽子加速器における実績や経験を有する加速器施設と研究者、大強度陽子ビームを用いた実験を実施し豊富な経験を有する実験施設とストレンジネス・ハドロン実験研究者、国際共同研究を主導的に遂行してきた重イオン研究者、実験研究の物理解釈に必須な理論研究者によって組織された大型研究計画である。

### 5.2 概算コスト

本計画の概算コストは、大型施設整備費として重イオン入射器施設の新設費と実験整備・準備研究費となる。

重イオン入射器施設の新設では、

	1年目	2年目	3年目	4年目	5年目	6年目	7年目～
(新規)施設設備	建設						
(新規)リニアック		建設 + 調整					
(新規)ブースターリング			建設 + 調整				
(新規)輸送ライン		■	■	■	建設 + 接続		
(既存)RCS+MR						調整	
(追加)実験整備	■						

図16 J-PARC-HI の加速器、検出器建設、及びビーム調整のスケジュール。

1. 施設設備：47 億円

建屋、冷却・空調システムなど

2. 重イオンリニアック：51 億円

イオン源、電磁石・電源、加速空洞・電源、モニタ・真空システムなど

3. 重イオンブースターリング：45 億円

電磁石・電源、加速空洞・電源、モニタ・真空システム、荷電変換システムなど

4. 輸送・接続ライン：7 億円

電磁石・電源、モニタ・真空システム、荷電変換システム、RCS 用入射キッカーなど

の概算 150 億円が必要な経費である。ドイツ GSI・FAIR 計画の 2000 億円規模とは異なり、既存の施設を利用する事により一桁低い予算規模で実現可能であるが、大型予算が必要となる。

実験整備・準備研究では、検出器 R&D、ビームライン、遮蔽体などの整備、既存の陽子ビームを用いた性能試験、海外研究機関における準備研究などで 10 億円の経費が必要である。上述したように、ハドロン実験施設拡張計画に沿って、実験規模を拡大する。その際、長年高エネルギー重イオン衝突実験で行われてきたように、海外研究機関も参加する国際共同研究として、参加した各研究機関の負担の下、実施する。

### 5.3 スケジュール

本計画のスケジュールは、図 16で示すように、大型施設である新たな重イオン入射器（リニアック、ブースターリング）の建設とビーム調整に 5 年、既存の陽子加速器施設との接続とビーム調整に 1 年を予定している。その期間に並行して、検出器 R&D を含む実験準備を行い、7 年目より重イオン衝突実験を開始する。

## 6 総括と展望

本提案書では、J-PARCにおいて世界最高強度の重イオンビームを加速し、重イオン衝突実験において高密度物質の相構造、状態方程式、ストレンジネス等の研究を行う J-PARC 重イオン計画 (J-PARC-HI) を提案している。

重イオンビーム設計性能は陽子からウランまでのイオンビーム、エネルギーは実験開始当初は核子当たり  $E_{\text{lab}} = 1 - 11.1$  AGeV、将来的には最大 18.8 AGeV であり、ビームレートは世界最高の  $10^{11}$  Hz を目指す。

このような重イオンビーム加速を J-PARC で実現するために、重イオンリニアックとブースターリングから構成される重イオン入射器 (建設費約 150 億円) を新たに建設する。入射器からのビームは既存の RCS、MR において加速することが可能である。

この大強度重イオンビームによって、前人未踏の高統計・稀粒子の粒子測定を行い、バリオン数等の保存量の高次揺らぎ、フロー、レプトン対等の測定によって QCD 相構造の研究を行い、またマルチストレンジネスを持つ未発見の粒子・原子核の探索を行う。

実験装置としては大型超伝導ダイポール磁石に基づく大立体角スペクトロメーターを検討しており、これによって  $10^6$  Hz までのイオン衝突レートにおける荷電ハドロン測定、 $10^7$  Hz までのミュオン対測定、 $10^8$  Hz までのビームラピディティーにおけるハイパー核、ストレンジレット探索等を行う。その先駆実験を、既存の E16 スペクトロメータ等を改造することによって開始することも可能であり、また測定器開発のプラットフォームとしても活用できると考えられる。

これらの未踏の高レート実験の実現のためには、新たな検出器技術開発が必要であるが、LHC による技術開発等、その道筋は明確に見えている。我が国の重イオン実験グループ、国際コラボレーションの総力を結集して技術開発を進めて行く。また、理論研究についても J-PARC エネルギーにおける動的モデル開発等理論の進展が必要である。我が国を中心とする理論研究グループと連携して進めて行く。

今後、本提案書を基に核物理コミュニティで議論を重ね、マスタープラン 2020 へ提出し、この計画の実現に向けて加速していきたい。