

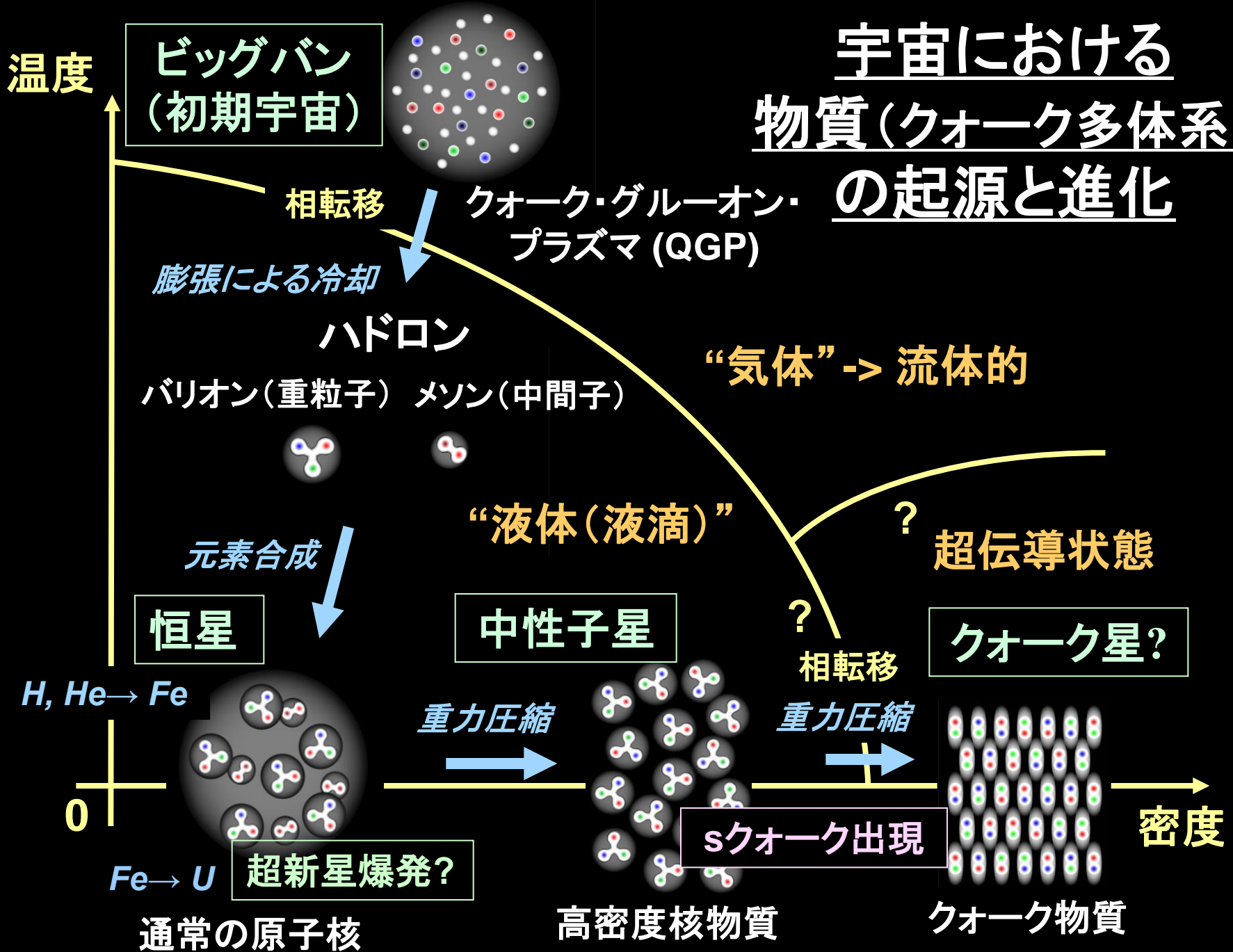
原子核物理の大型計画

東北大学 理学研究科 物理学専攻
田村 裕和

- 原子核物理の課題
- 1. J-PARC高度化: 理研によるハドロン物理推進
- 2. RIビームファクトリー高度化:
「安定の島」を目指したRI核反応学の推進
- まとめ

原子核物理の課題

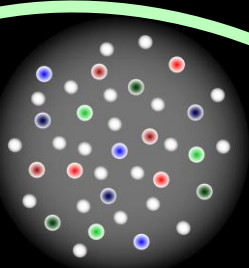
宇宙における物質(クォーク多体系)の起源と進化



宇宙における物質(クォーク多体系)の起源と進化

温度

ビッグバン
(初期宇宙)



相転移

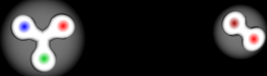
クォーク・グルーオン
プラズマ (QGP)

高エネルギー
原子核衝突実験
(RHIC@BNL, LHC@CERN)

ハドロン形成
(質量獲得, クォーク閉じ込め)
の謎

ハドロン

バリオン(重粒子) メソン(中間子)



“気体” -> 流体的

“液体”

ハドロン物理
(J-PARC, ELPH,
RCNP/LEPS,...)

? 超伝導状態

元素合成

不安定核物理
(RIビームファクトリー,...)

中性子星

? クォーク星?

$H, He \rightarrow Fe$

精密核物理
(RCNP,...)

重力圧縮

? 相転移
ストレンジネス核物理
(J-PARC)

ウランにいたる
元素合成の謎

sクォーク出現

$Fe \rightarrow U$

超新星爆発?

密度

通常の原子核

高密度核物質

クォーク物質

科学・夢ロードマップ 原子核物理学



原子核物理の大型計画

大型施設計画 (修正)

■「J-PARC加速器の高度化による物質の起源の解明」

のうちの原子核パート:

「理化学研究所によるJ-PARCハドロン物理推進」

理化学研究所 延与秀人

■「RIビームファクトリーの高度化による“安定の島”を 目指したRI核反応学の推進」 (タイトル変更)

理化学研究所 延与秀人

大規模研究計画 (新規)

■「超高感度測定による物質宇宙の起源の解明」

大阪大学核物理研究センター(RCNP) 岸本忠史

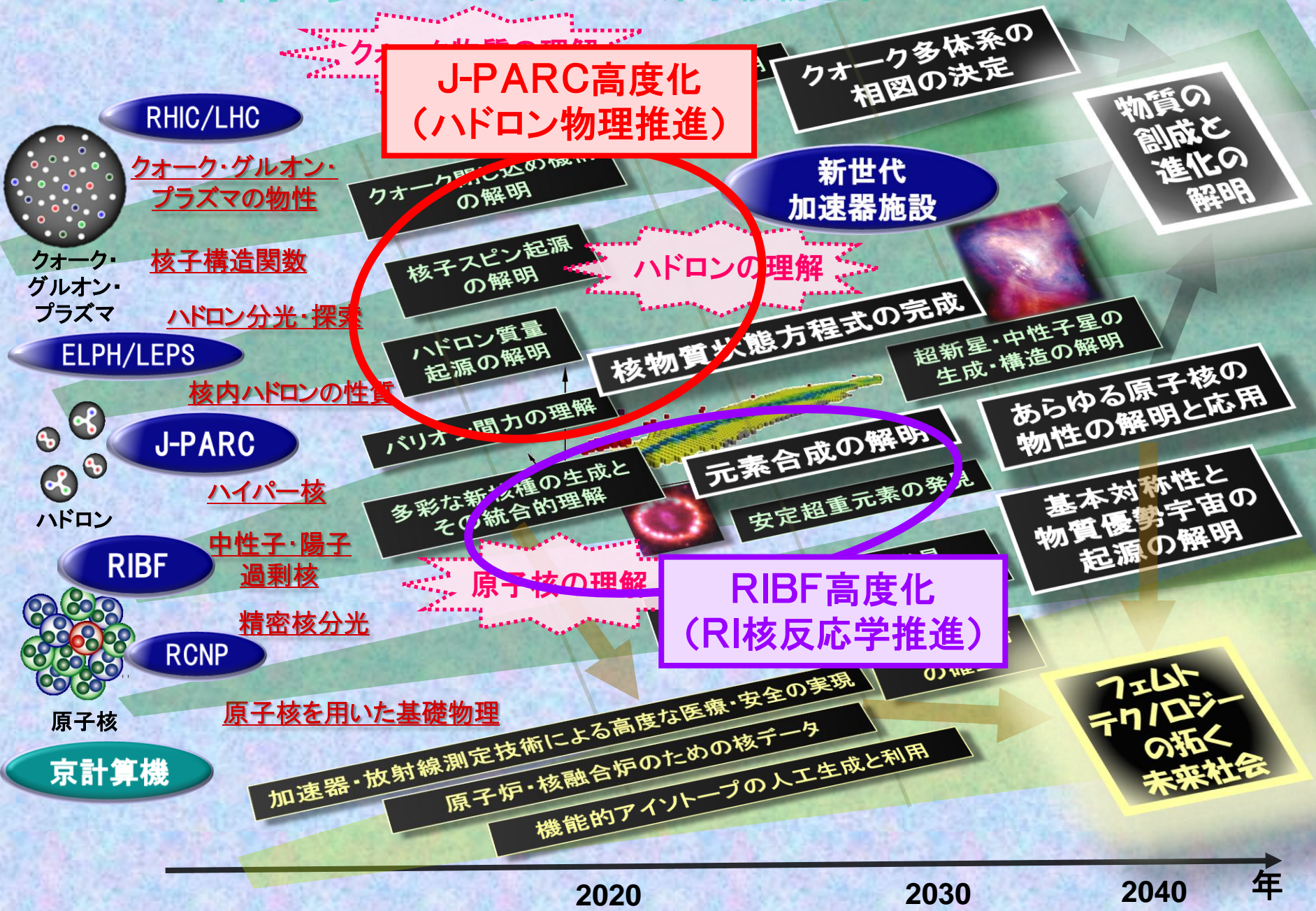
■「光子ビームによるクォーク核物理研究計画」

東北大学電子光科学研究センター(ELPH) 清水肇 (+大阪大学核物理研究センター)

■「超低エネルギー反陽子リングを用いた反物質の研究」

東京大学 早野龍五

科学・夢ロードマップ 原子核物理学



1. J-PARC加速器の高度化による 物質の起源の解明 (原子核パート)

理化学研究所による
J-PARCハドロン物理推進

J-PARC

Tokai, Japan

(Japan Proton Accelerator Research Complex)

Material and Biological Science Facility

50 GeV Synchrotron
(15 μ A)

3 GeV Synchrotron
(333 μ A)

400 MeV Linac
(350m)

Neutrino Facility

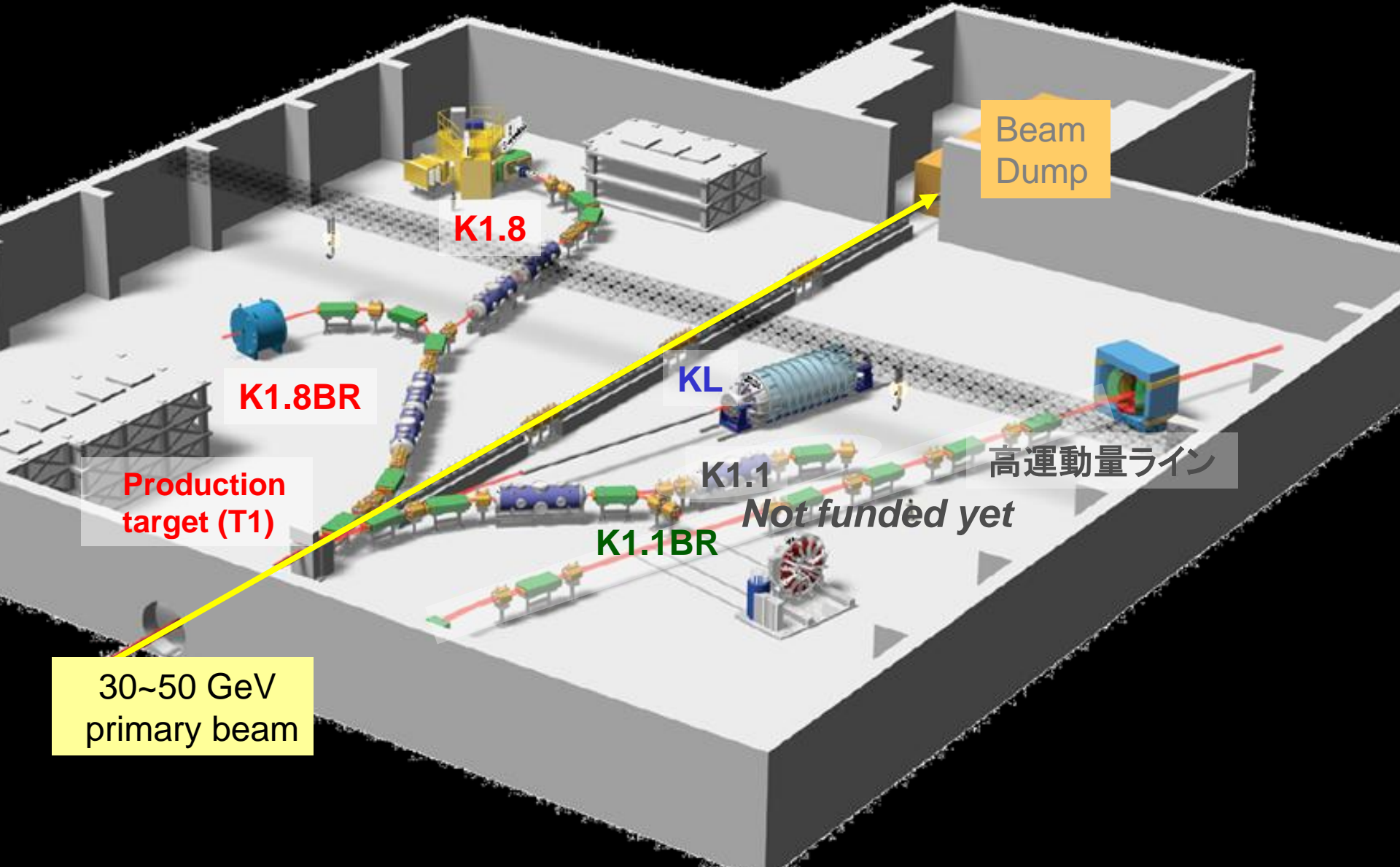
原子核素粒子実験施設
(ハドロンホール)

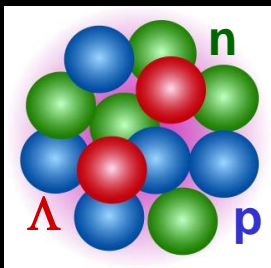
世界最高強度の
中間子 (K^\pm , K_L^0 , π^\pm) ビームを生成
BNL-AGSの10倍、KEK-PSの数100倍

2009年稼動、
ビームの強度・時間変動は改善中

60m x 56m

現在のハドロン実験施設と 採択・提案されている実験





Ξ ハイパー核分光

ΛΛハイパー核

Ξ-原子X線

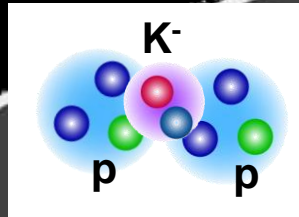
Λハイパー核 γ 分光

中性子過剰 Λハイパー核

ペンタクォーク^{Θ+} 探索

K-pp束縛状態探索

ハイパー核弱崩壊(A=4)
 ハイパー核弱崩壊(A=12)
 π 二重荷電交換反応
 ω中間子原子核
 Σp 散乱実験



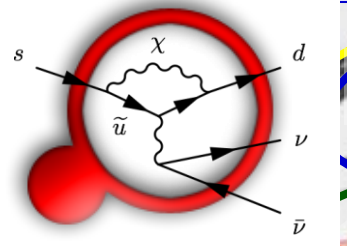
K1.8

K⁰_L中間子稀崩壊

Dump

核内ハドロンの質量
 核子のクォーク構造

K1.8BR



KL

K1.1

Not funded

高運動量ライン

Kpp束縛状態探索

K- 原子X線

η中間子原子核

K⁺崩壊での時間反転対称性
 K⁺崩壊でのレプトン普遍性
 Θ⁺確定実験

φ中間子原子核
 Λハイパー核 γ 分光
 Σハイパー核
 YN 散乱実験
 Θ⁺ ハイパー核

30~50 GeV
 primary beam

採択(stage-2) / 採択(stage-1) / 申請済 (LOI含む)

μ-e転換の探索

ハドロンホール拡張の必要性

- 狭い面積 ⇔ KEK-PS ~2.4倍, BNL-AGS ~4.1倍
- わずか4本のビームライン ⇔ KEK-PS ~7本, BNL-AGS ~15本

→ 運転効率が悪い(成果/電気代)

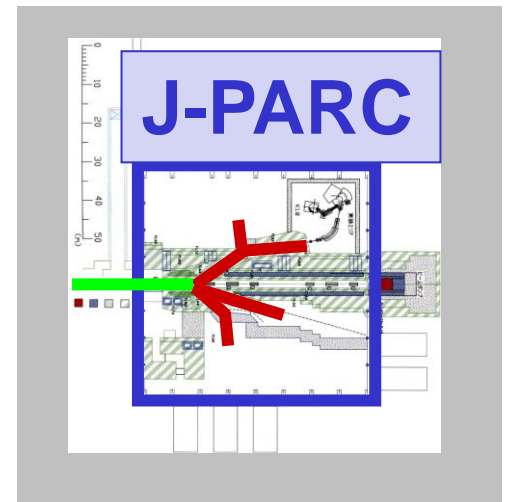
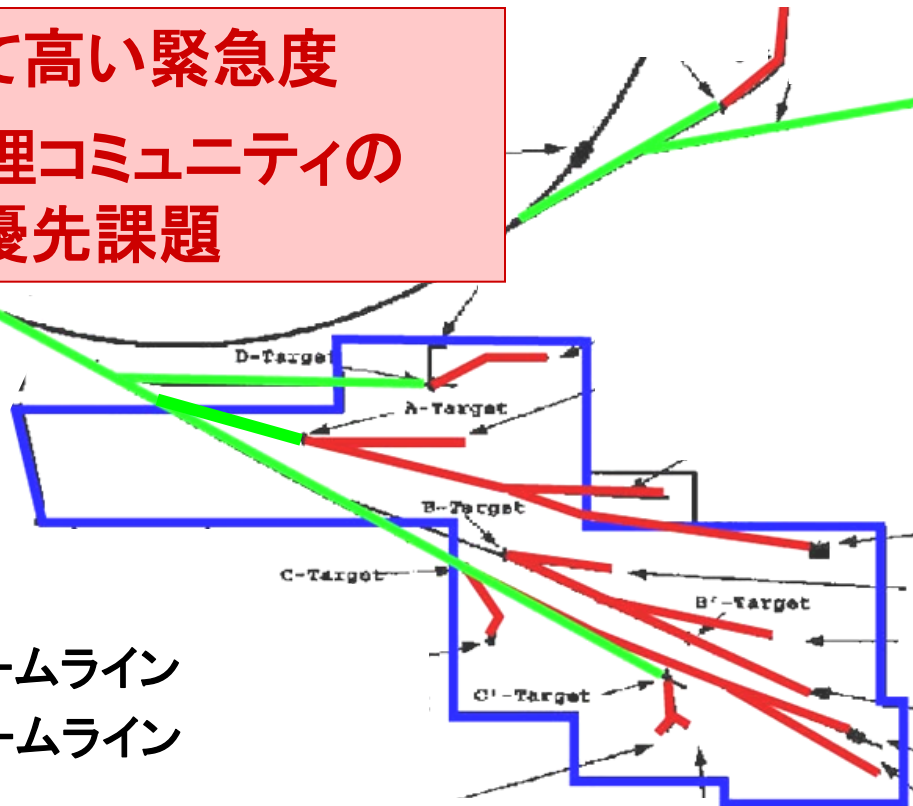
長い待ち行列 (K1.8/K1.8BRのstage-2採択だけで 6960 h~6年分以上)

→ 期待していた世界のユーザーが失望, 世界での優位性揺らぐ

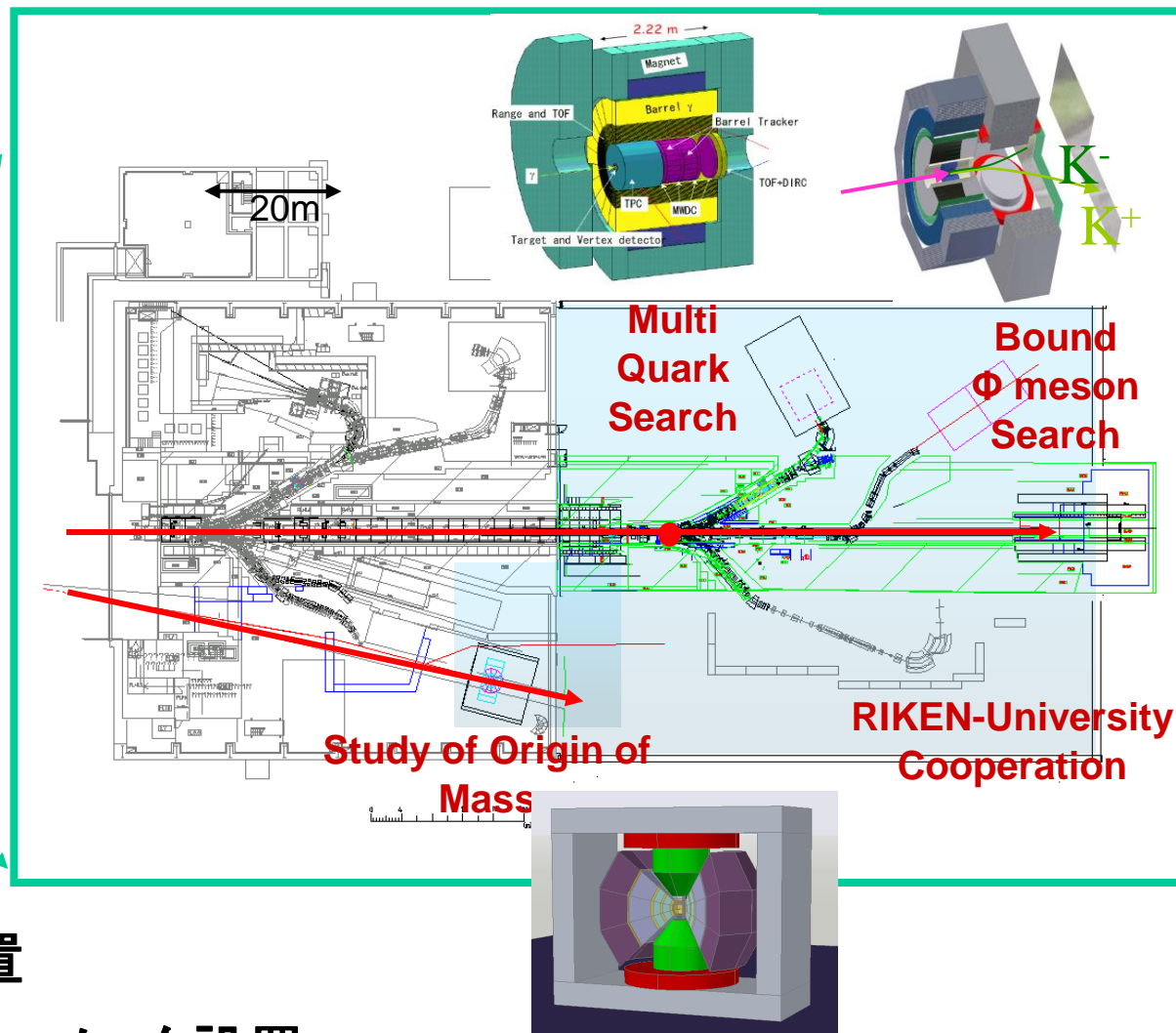
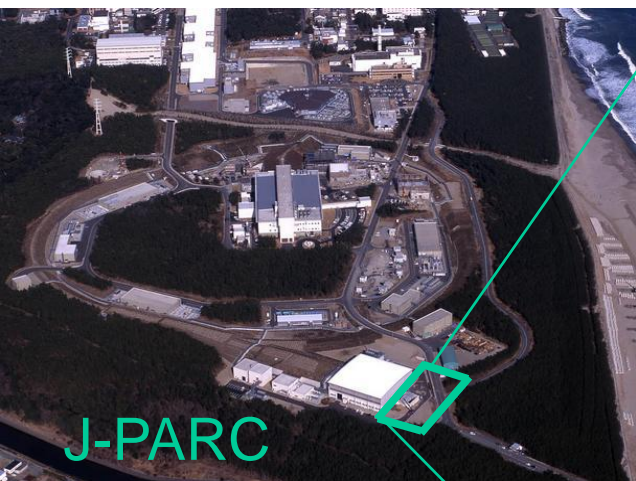
きわめて高い緊急度
原子核物理コミュニティの
最優先課題

BNL-AGS

- 1次ビームライン
- 2次ビームライン



理研J-PARC連携センター構想



- ハドロンホールを拡張
- 第二生成標的を設置
- ビームラインを数本設置
- ハドロン研究用スペクトロメータ設置

2012年度予算要求を目指す

計画概要と背景

物質とその質量の起源の解明を行なうことを目的として、理化学研究所が推進して来た「対称性の自発的破れによるハドロン質量生成メカニズム解明」を端緒に、強い相互作用に支配されたクォーク多体系の詳細な研究を実行する。そのため、すでに提出された「J-PARC加速器高度化による物質の起源の解明」のなかで、ハドロン実験室高度化および拡充は不可欠であり、この部分を理研が責任をもって遂行しようとするものである。

研究内容

■ ハドロン物理 強い相互作用に支配されたクォーク多体系

■ 核内ハドロンを用いたハドロン質量の起源の解明

■ 新しい形態のハドロン($qq\bar{q}\bar{q}$, $qqqq\bar{q}$, $qqqqqq\bar{q}$..)の探索

■ ハドロンの内部のクォーク構造

⇒ ハドロンの本質的理解

(クォーク閉じ込め、質量の起源、構造)

■ ストレンジネス核物理 (様々なハイパー核、K中間子核)

⇒ 核力の本質 (原子核形成の謎)、高密度核物質

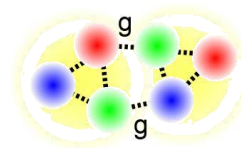
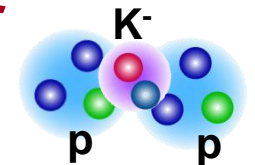
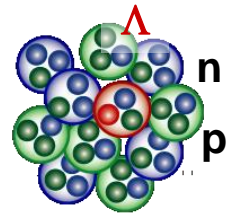
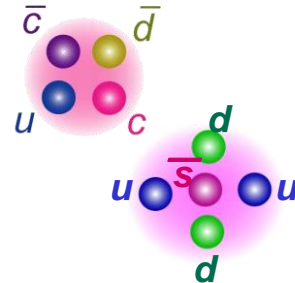
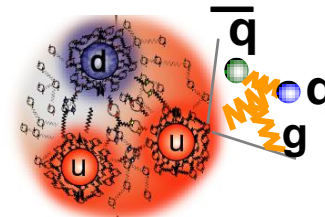
■ 素粒子物理 にも有効

■ K中間子の稀崩壊

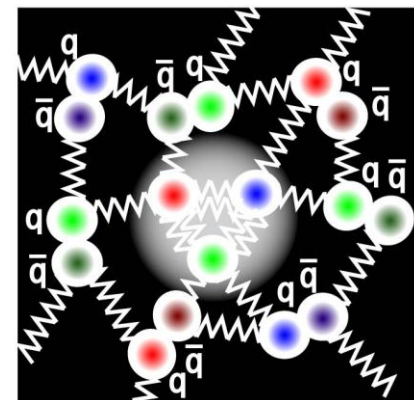
■ ミュー粒子の稀崩壊

⇒ 素粒子の統一理論

物質優勢宇宙の理解



物質(ハドロン)の質量の謎



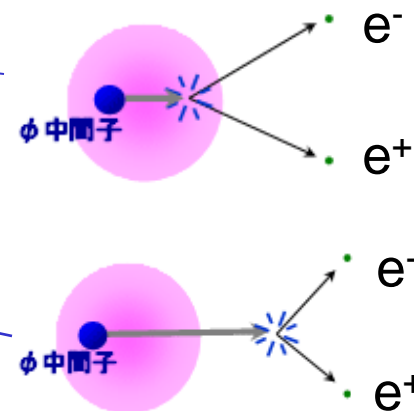
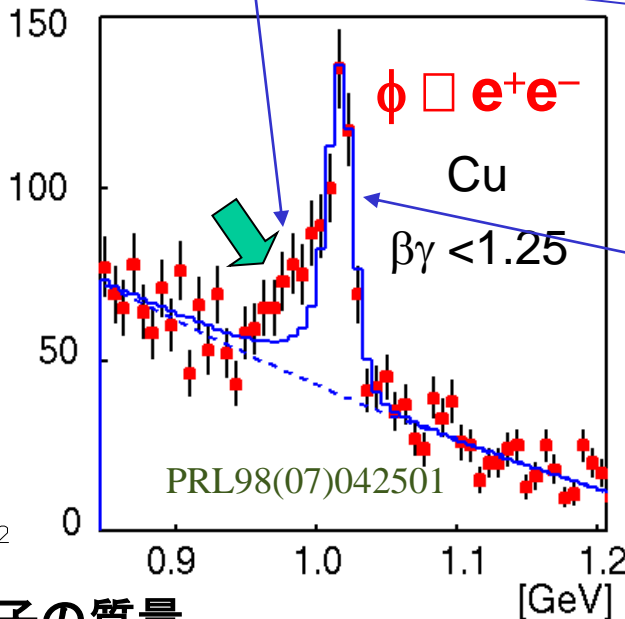
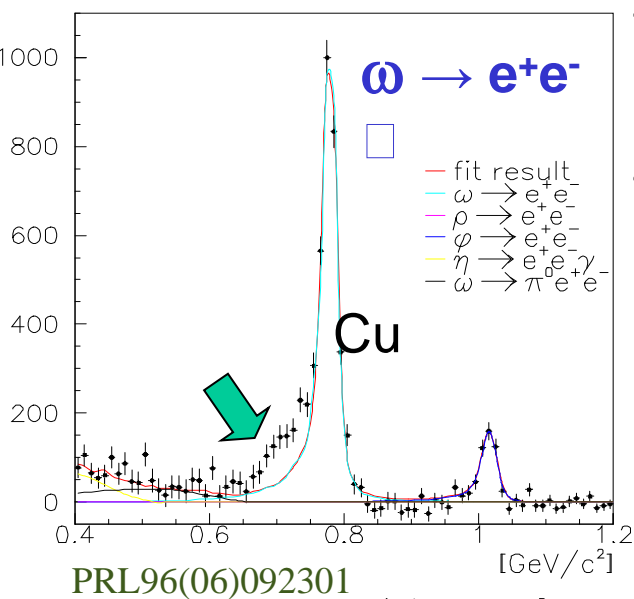
u, d クォークは低温低密度では質量が ~100倍大きくなる

“カイラル対称性の自発的破れ”(南部)

...物質世界の質量の大部分の起源

QCD: $q\bar{q}$ 対が空間に凝縮して真空のエネルギーを下げ、クォークが有効質量獲得

その証拠は? → 核内では、クォーク質量が少し戻る(軽くなる)はず

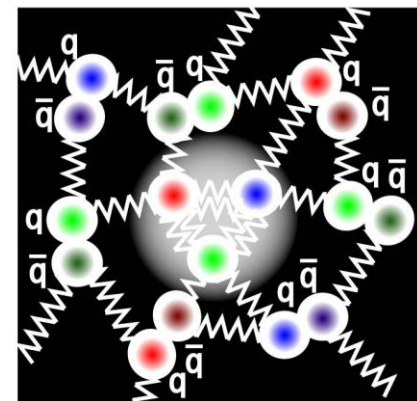


=> J-PARCで詳細に研究
E16 (理研グループ)
高運動量ラインが必要
実験室スペースも不足

ベクトル中間子の質量

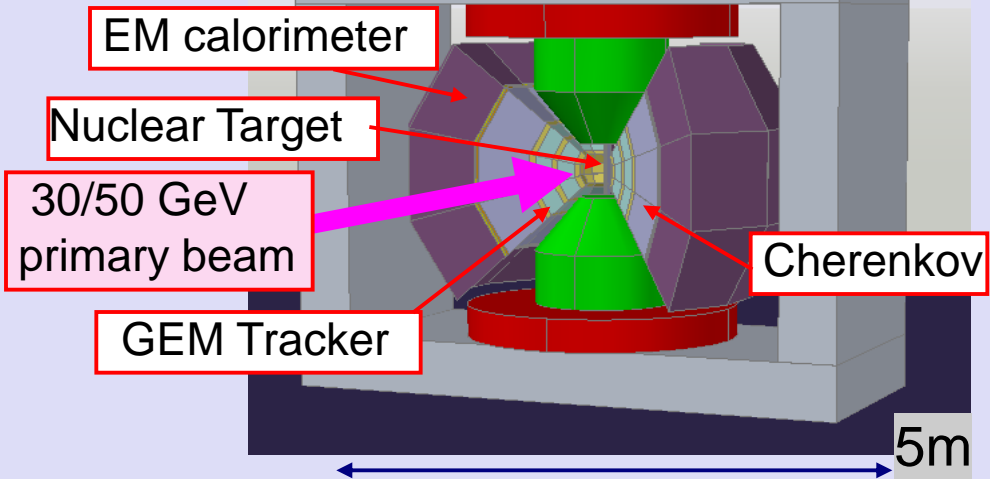
KEK-PSの実験で見えた!

量の謎

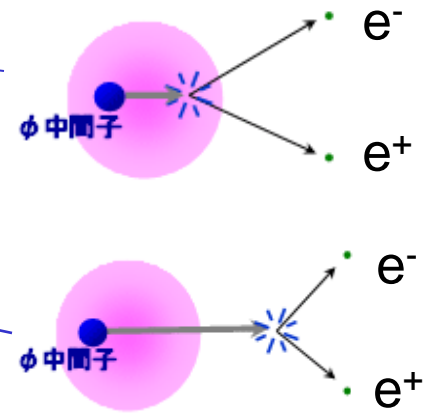
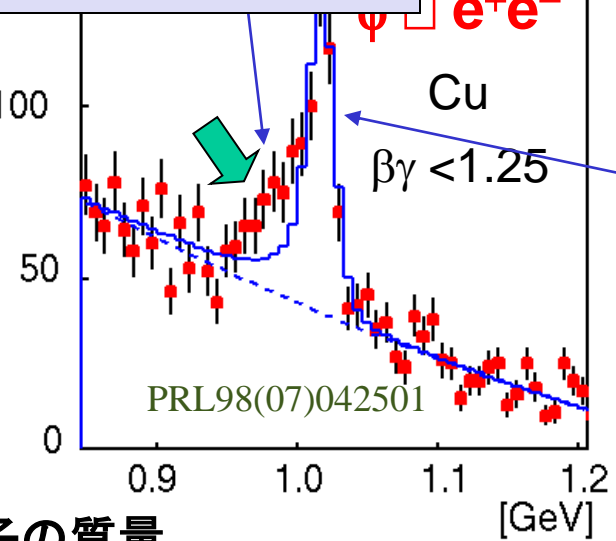
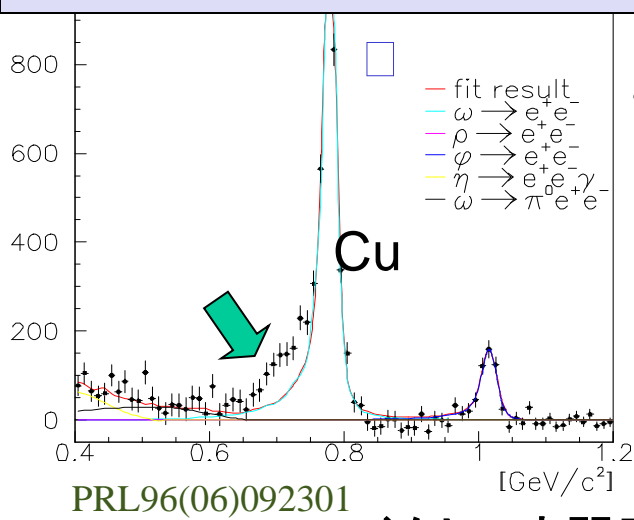


倍大きくなる

ゲージを下げ、クォークが有効質量獲得が少し戻る(軽くなる)はず



**E16: 100倍の統計量, 核密度・速度依存性を測定
— QCDの予想との詳細な比較**



**=> J-PARCで詳細に研究
E16 (理研グループ)
高運動量ラインが必要
実験室スペースも不足**

ベクトル中間子の質量

KEK-PSの実験で見えた!

予算、運営等

予算：原子核素粒子実験施設拡充、ハドロン施設 100億円

内訳：実験実施施設建設費 66億円

：ビームライン増強・新設 25億円

：大型スペクトロメータ整備費 9億円

運営費の考え方は調整中。事務的な予備折衝を行い、建設に伴う施設管理上の問題は解決可能である見通し。

建設：H23~H27

運営：共同利用的な運営

課題採択委員会(PAC)はKEK/理研共同開催とすべく検討中

原子核物理コミュニティとして全面的にサポート

KEK首脳陣も前向きにとらえている

2. RIビームファクトリーの高度化による 「安定の島」を目指したRI核反応学 の推進

「安定の島」領域の原子核（安定超重元素）

Z=114, 120; N=184 半減期 日～年

原子核物理学者の夢の領域

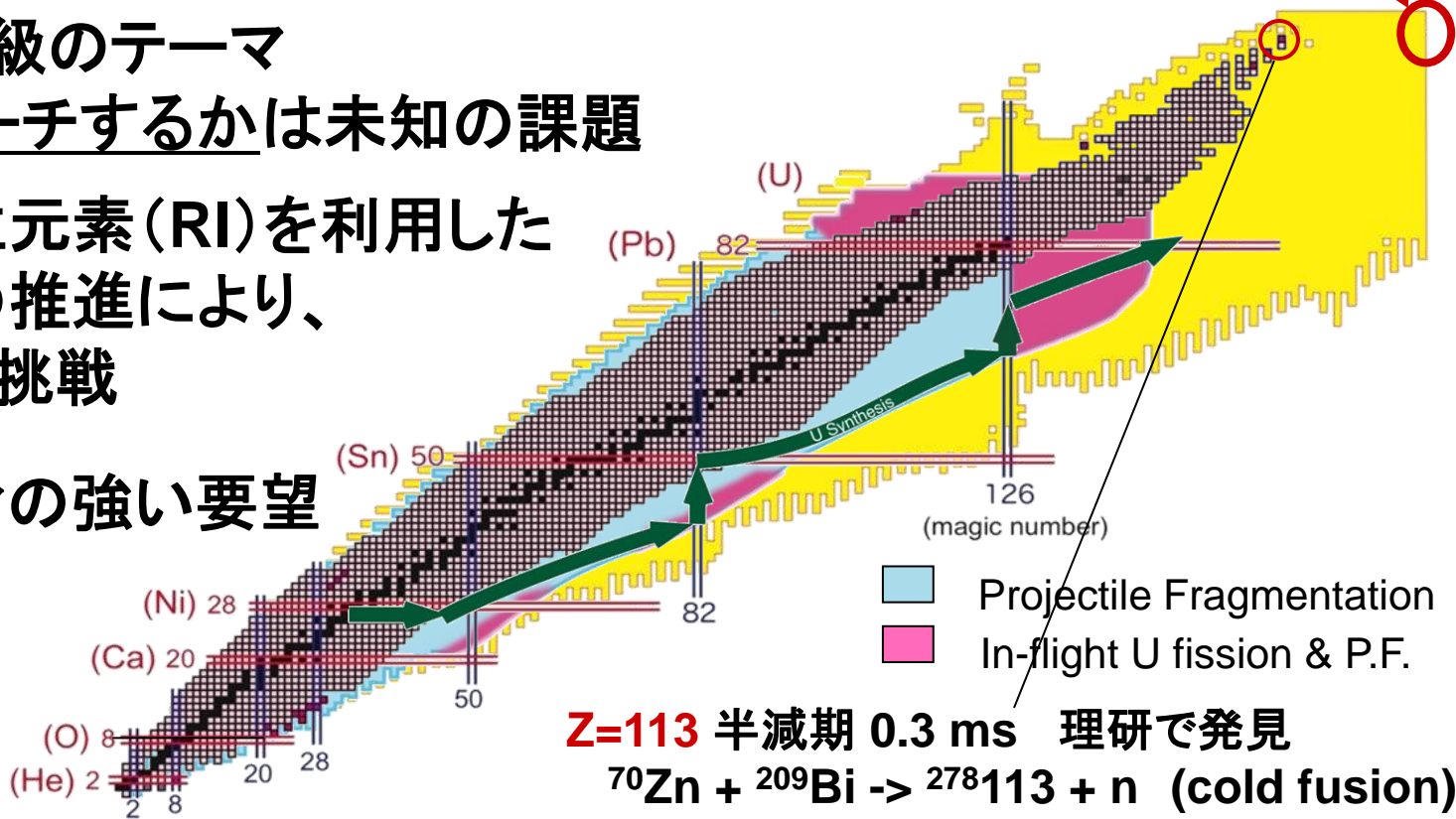
自然界では生成されない安定な核の存在が予想される

ノーベル賞級のテーマ

どうアプローチするかは未知の課題

放射性同位元素 (RI) を利用した
RI 反応学の推進により、
この課題に挑戦

コミュニティの強い要望

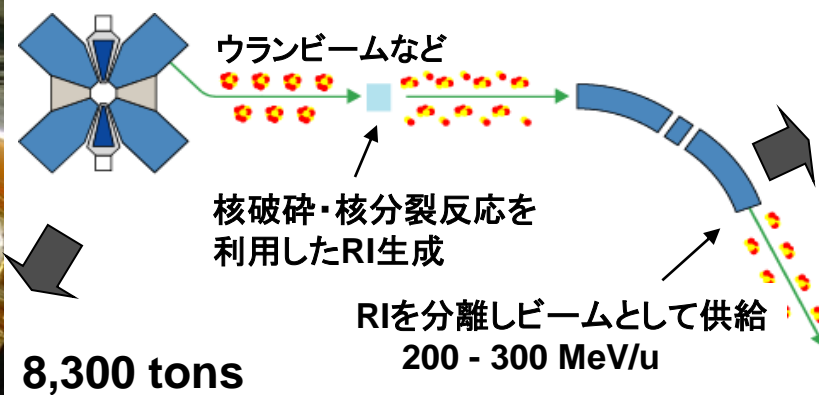
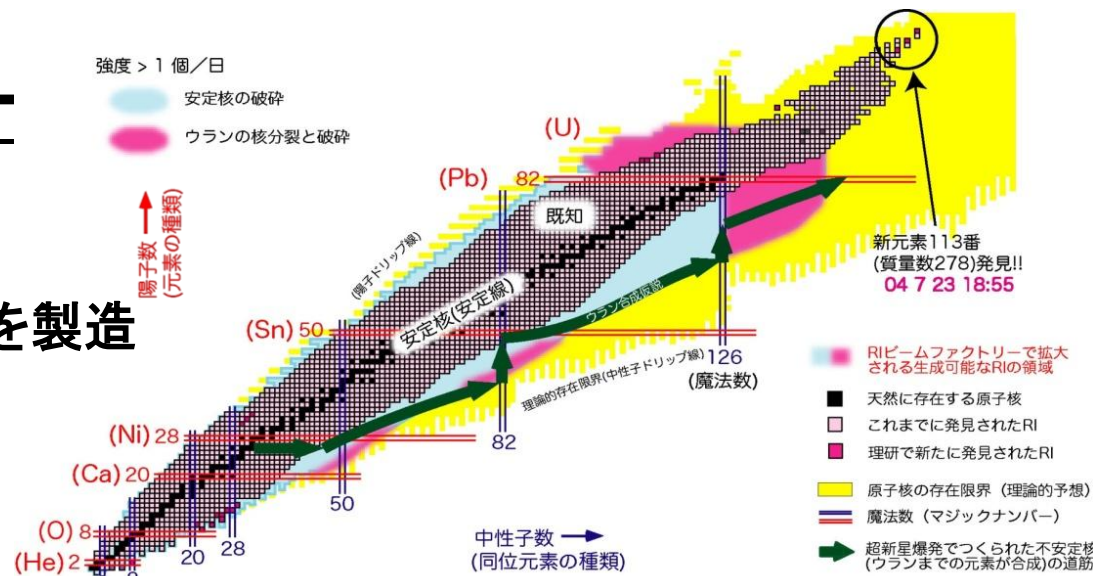


安定核同士の反応ではこれ以上中性子過剰側へ行けない
中性子過剰核RIビームを大量生成、加速して反応させる

RI ビームファクトリー

1000種の新核種を含む
総数4000種の不安定原子核(RI)を製造
世界最高強度のRIビームを供給

国際的に開かれた運営
(外国人ユーザー20%)



世界初、史上最強
超伝導リングサイクロトロン (SRC)
水素からウランを光速の70% (350 MeV/u) に加速
ウランを目標まで加速に成功 2006.12

世界最大口径 9 Tm (77 m)
超伝導RIビーム収集分離装置 (BigRIPS)
核分裂片の約50%を収集
世界最高のRIビーム分解能達成 2007.5

RIビームファクトリーの目指すもの

1) 究極の原子核構造モデルの構築

1980年代に日本人が発明したRIビーム発生利用技術により従来の“原子核の常識”は覆された。さらなる研究により、新しい普遍的な原子核構造理論を構築する。

2) 元素の起源解明

「物理学上、未解決の大きな11の謎」

(米国ナショナルアカデミー) の1つ

“ウラン合成過程”を世界に先駆け解明する。

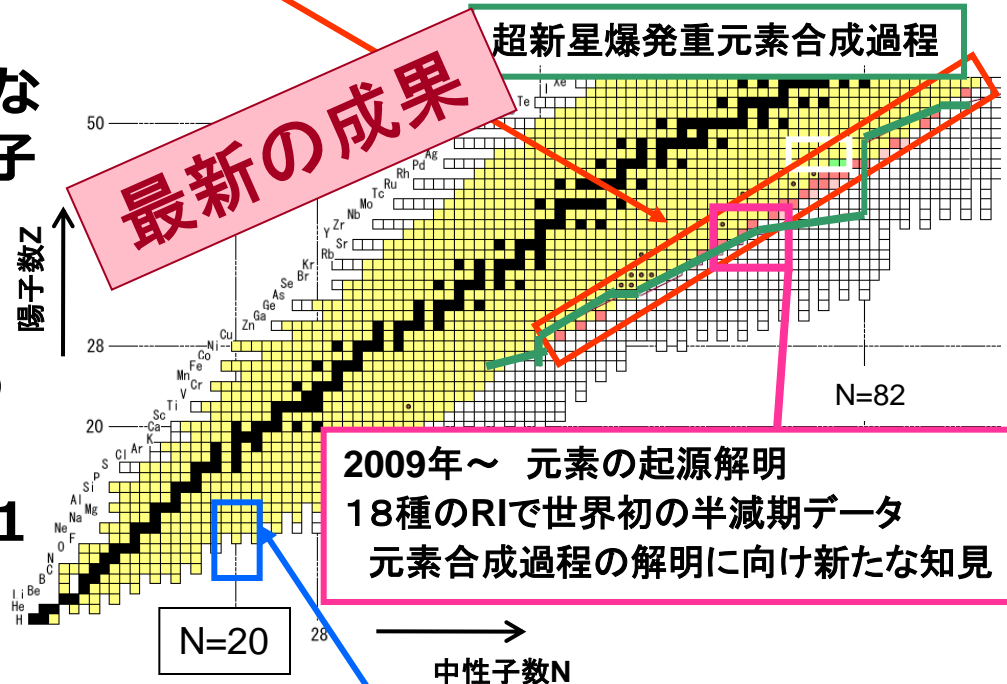
3) 新しい産業利用の開拓

RIを用いた革新的な材料開発研究、新たながん治療法の開発、

核変換科学の強復の増強とともにより重い領域、より中性子過剰な領域へ

2007年～ 核図表の拡大

Zn(Z=30)からI(Z=53)までの47種の新同位元素の発見



最新の成果

超新星爆発重元素合成過程

2009年～ 元素の起源解明

18種のRIで世界初の半減期データ
元素合成過程の解明に向け新たな知見

2008年～ エキゾチックな原子核構造

中性子数20の魔法数喪失現象 ^{32}Ne 大変形
新規ハロー核(変形ハロー) $^{29,31}\text{Ne}$ (Z=10)の発見

「安定の島」へ向けたRI反応学研究を世界に先駆け推進



■ RIビーム発生系の高度化

→ 5 ~ 345 MeV/uの広いエネルギー帯、
超大強度(現行RIBF目標のさらに100倍)の
RIビームを供給

■ 様々な原子核を自在に生成するための RI核反応学研究を推進

■ 核変換技術の基盤形成と 「安定の島」の原子核を人工生成する道へ

■ RIビームファクトリー と同様、アジアを意識 した施設運営

新しい超伝導加速器
の建設

5 MeV/u

超伝導線形加速器
の建設

RIイオン源の建設

345 MeV/u

予算規模: 150億円

(参考: RIBF施設整備費

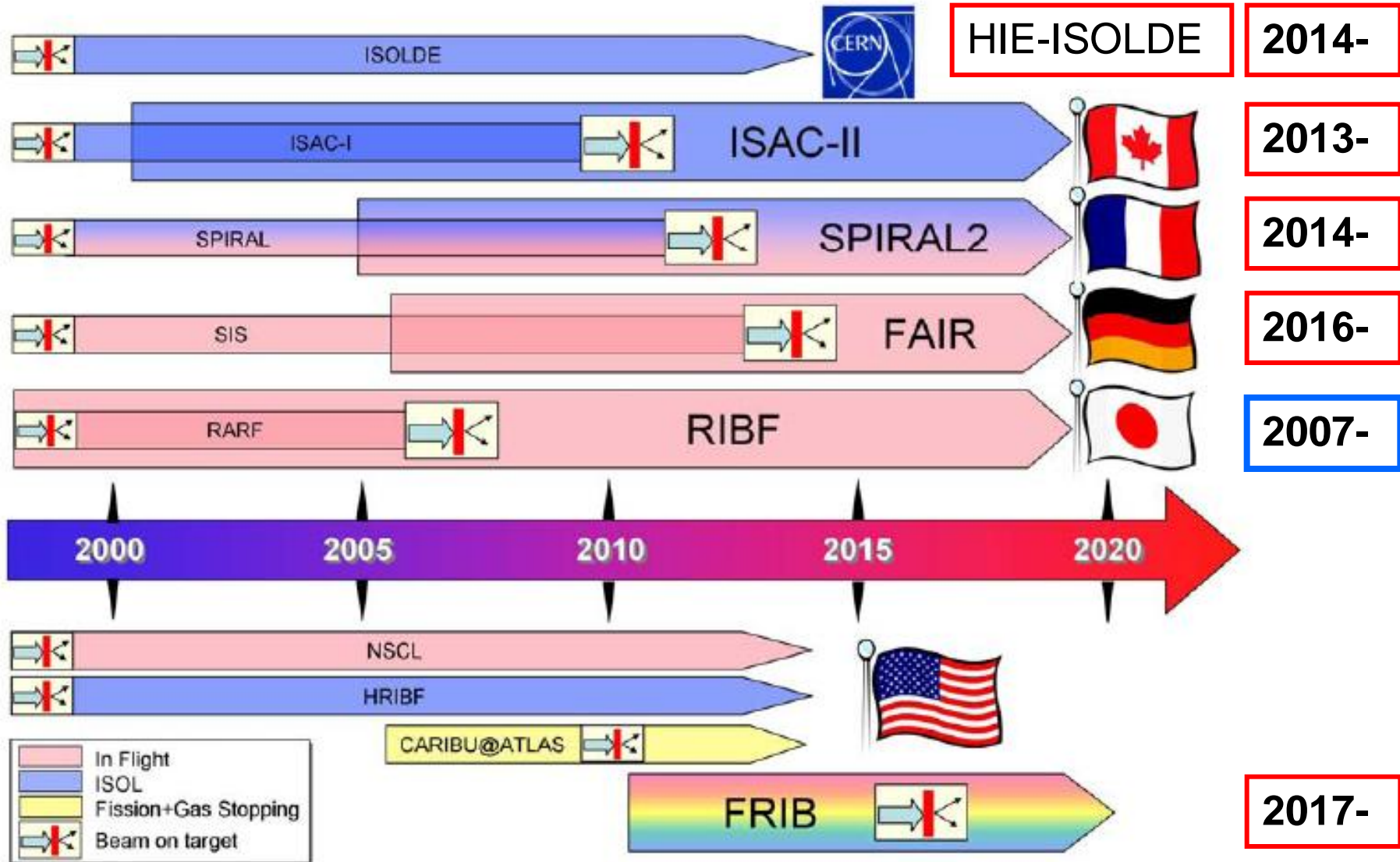
RIビーム発生系 440億円

基幹実験施設 55億円)

期間: 2013~2017年度

世界の主要な研究所の将来計画

欧米の将来計画がRIBFを猛追



まとめ

- 核物理の目的は、宇宙における物質の起源と進化の全体像を理解すること。
J-PARCとRIBFは、ハドロン・原子核の世界最高の研究施設として一層の発展が期待される。
- J-PARCは、質量の起源などのハドロンの本質的理解に向けて高度化が必要。
ハドロン実験施設の拡充とビームライン増設を理研が行う。
- RIBFは、「安定の島」(安定超重元素の合成)へ向けてRI反応学を推進する。
不安定核ビームの発生・加速装置の高度化が不可欠。
- いずれも核物理コミュニティの強い要望に基づく。