

高エネルギー重イオン(II) J-PARCでの研究 「J-PARCでの重イオン加速に よる高密度QCDの研究」

郡司 卓(東京大学原子核科学研究センター)

他 核物理の将来高エネルギー重イオンWG & J-PARC-HI



Outline

30

▶ J-PARC-HIの意義と目指す物理

- ▶ 臨界点や相転移の検証
- ▶ カラー超伝導相の探索へ

▶ 分野の現状と緊急性

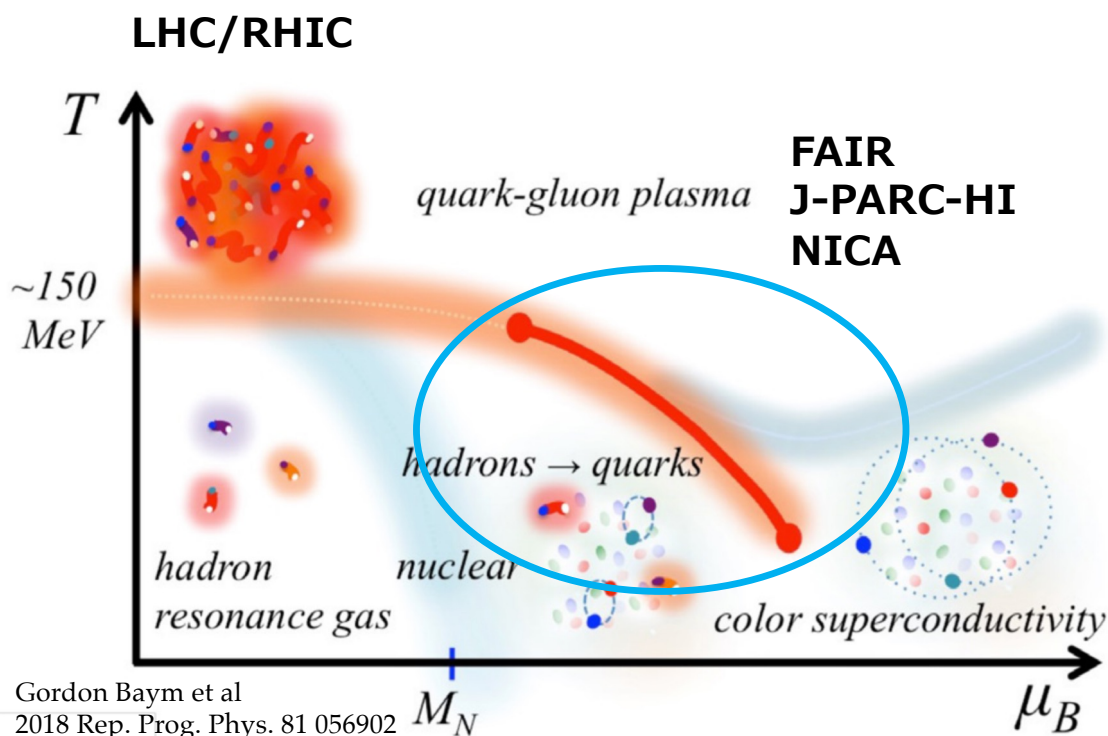
▶ 今後の計画

- ▶ B. 提案したいプロジェクト（期間は設けないがおよそ10年程度まで）
- ▶ C. 20~30年先を見据えた将来の構想や目標

▶ まとめ

J-PARC-HIの意義

31



① 高密度物質によるQCD真空の破壊

- クォーク凝縮(秩序変数)の溶解
- 物質やハドロンの基本的性質の変化
- 99%以上の質量の起源の解明

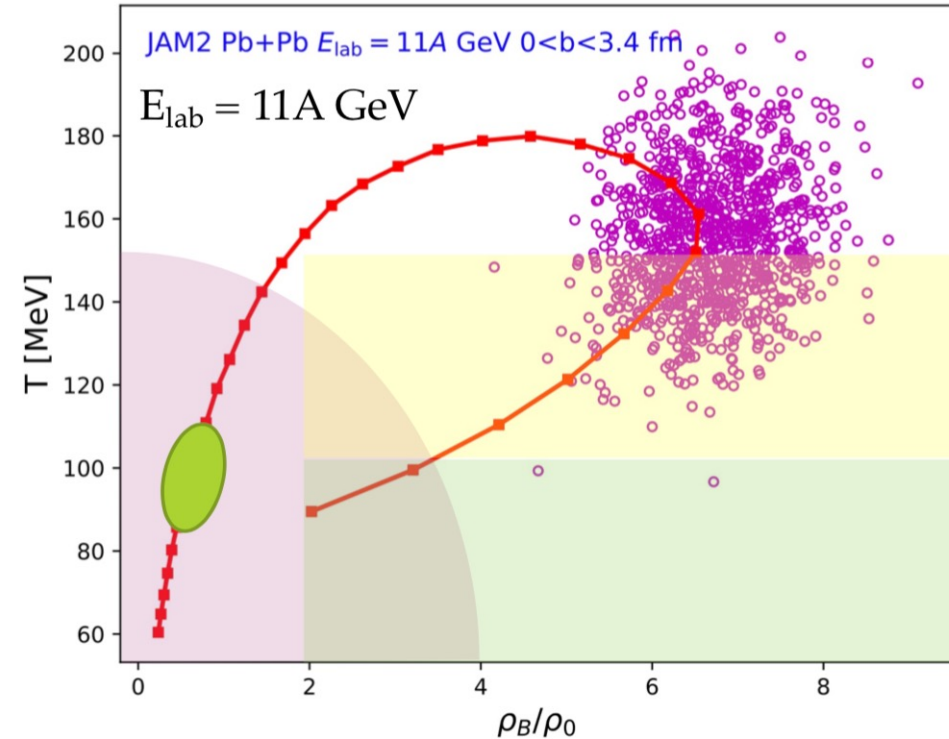
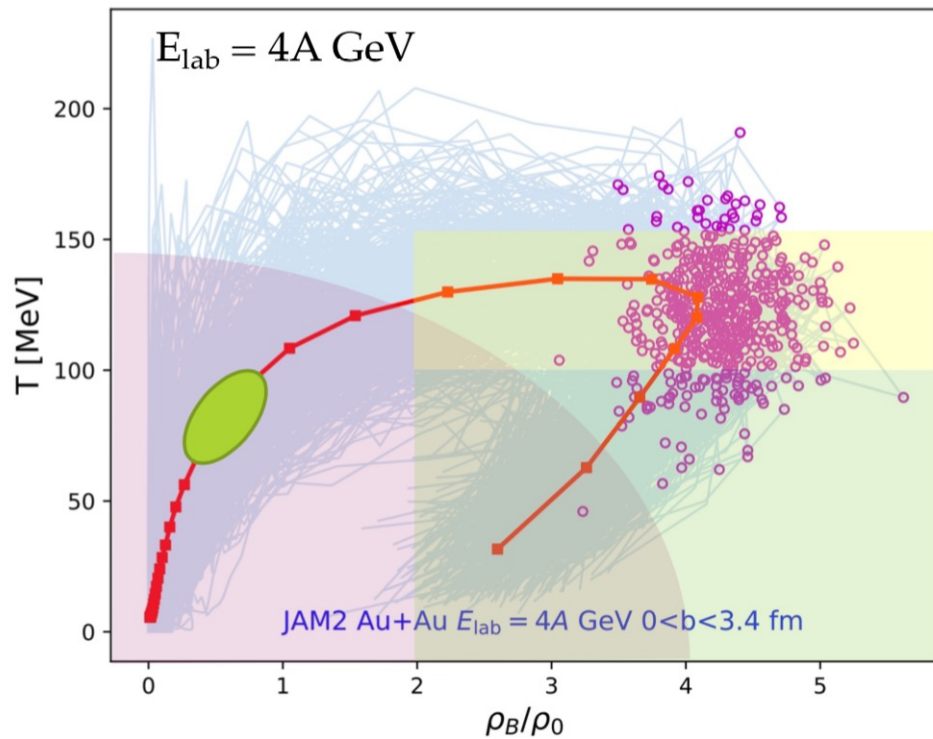
② 素粒子物性の開拓

- 相構造(臨界点、一次相転移)の解明
- 高密度クォーク物質物性の解明
- カラー超伝導相の探索、南部理論の検証

③ 高密度星の内部構造

- 地上での行う極微の中性子星衝突
- 宇宙最高物質の状態方程式や輸送特性

最高到達密度@J-PARC-HI



最大到達密度 = $4-8\rho_0$ @ $\sqrt{s_{NN}} \sim 2-5 \text{ GeV}$

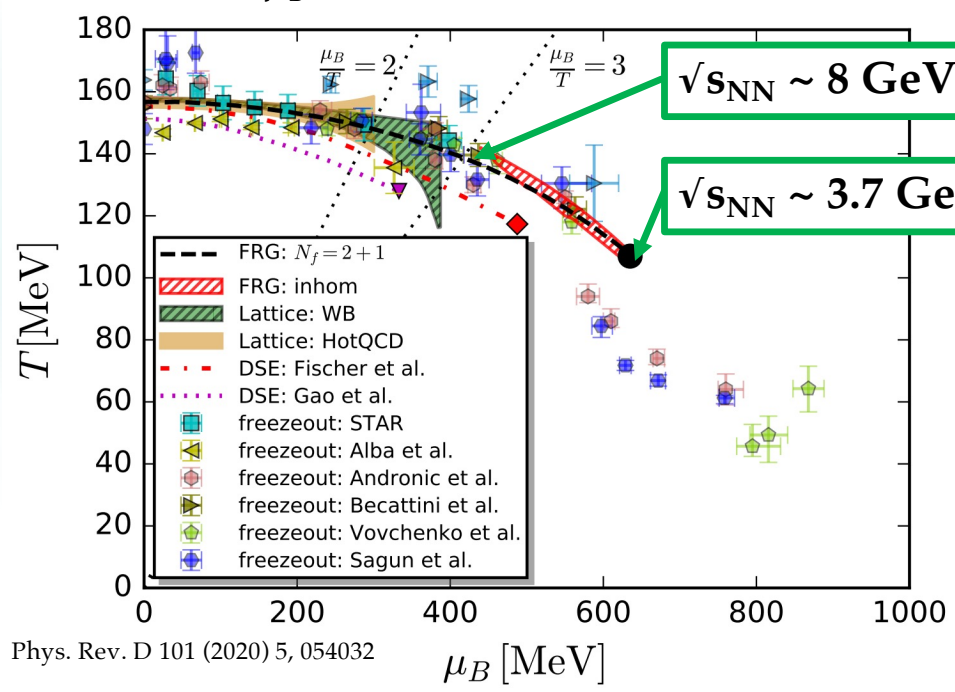
高輝度を生かした稀事象(高密度イベント、レプトン対、重クォーク)の選択
 高統計によるQCD相構造の精密な検証

臨界点や相転移の検証

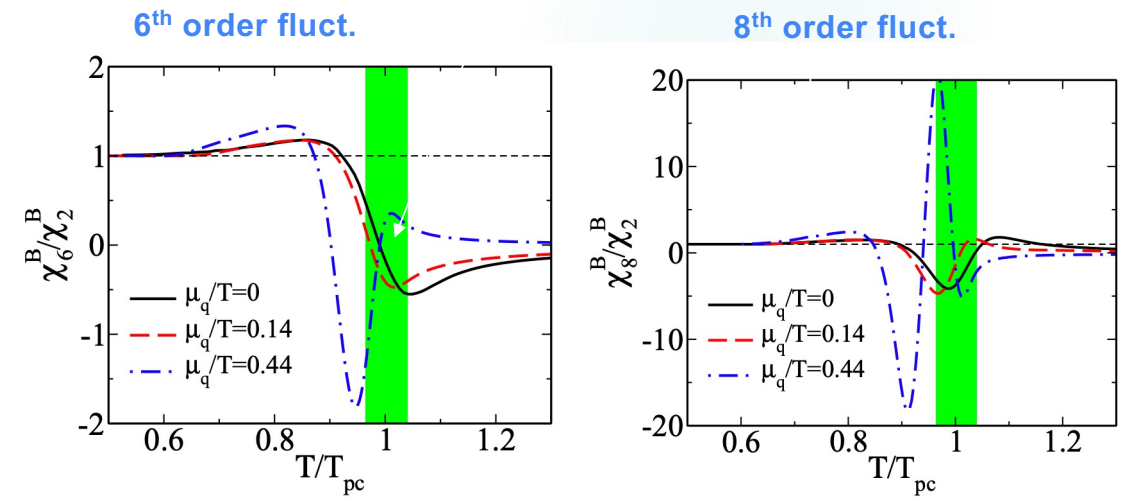
▶ 保存量揺らぎの高精度測定

▶ 系の相関長や相転移近傍(臨界点、クロスオーバーや一次相転移)に感度

$T^{\text{CEP}} < T_c = 132^{+3}_{-6} \text{ MeV}$, $\mu_B^{\text{CEP}} > 3 T_c \sim 400 \text{ MeV}$
 $(T^{\text{CEP}}, \mu_B^{\text{CEP}}) = (107, 635) \text{ MeV}$



Phys. Rev. D 101 (2020) 5, 054032



Eur. Phys. J. C 71 (2011) 1694

J-PARC-HIでの高精度測定

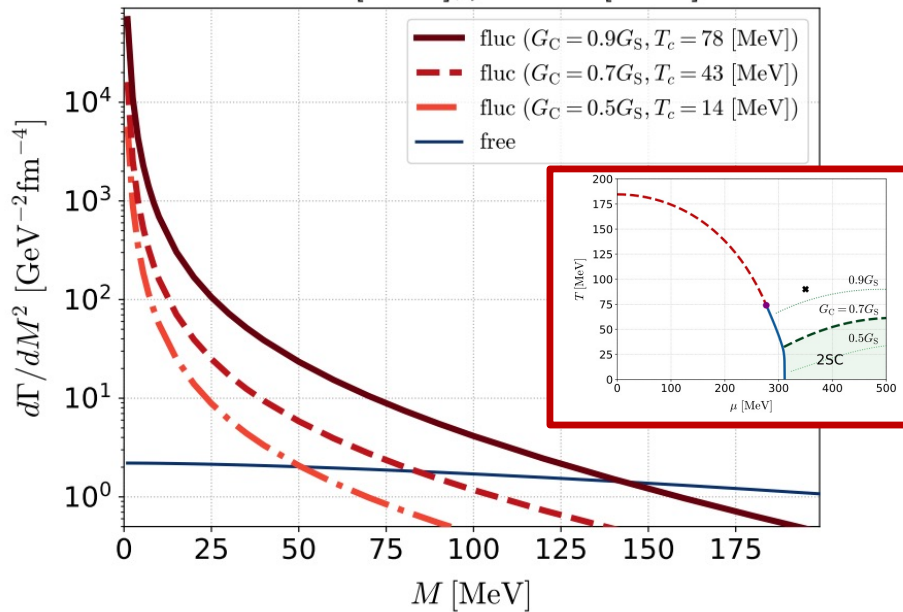
カラー超伝導相の探索へ

▶ 低質量&低運動量電子対の収量増大

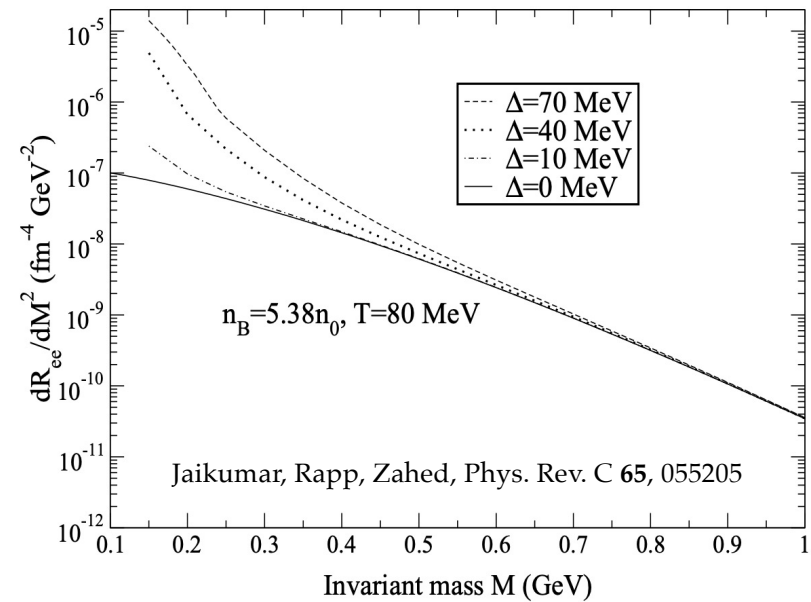
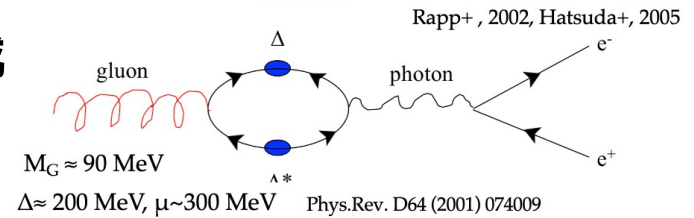
J-PARC-HIでの高精度測定

カラー超伝導の前駆状態
→ ダイクォークの大きな揺らぎ

T. Nishimura, M. Kitazawa,
T. Kunihiro,
arXiv:2201.01963 $T = 90$ [MeV], $\mu = 350$ [MeV]



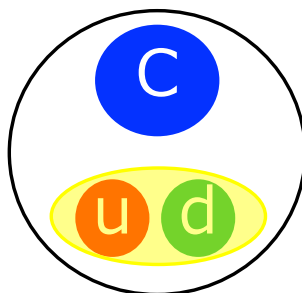
CFLでの電子対生成
グルーオンの崩壊



カラー超伝導相の探索へ

▶ チャームバリオン収量

チャームは系の不純物
 ダイクォーク自由度の良いプローブ
 CSC中での収量増大



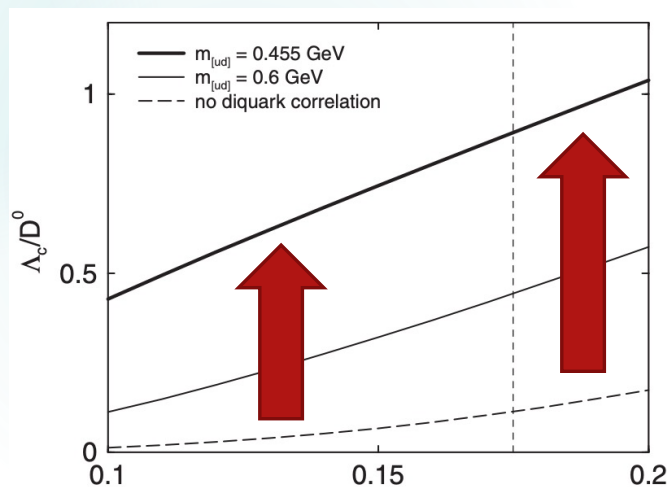
J-PARC-HIでの高精度測定

$$\Lambda_c(c[u,d]) > \Xi_c^+(c [u/d,s])$$

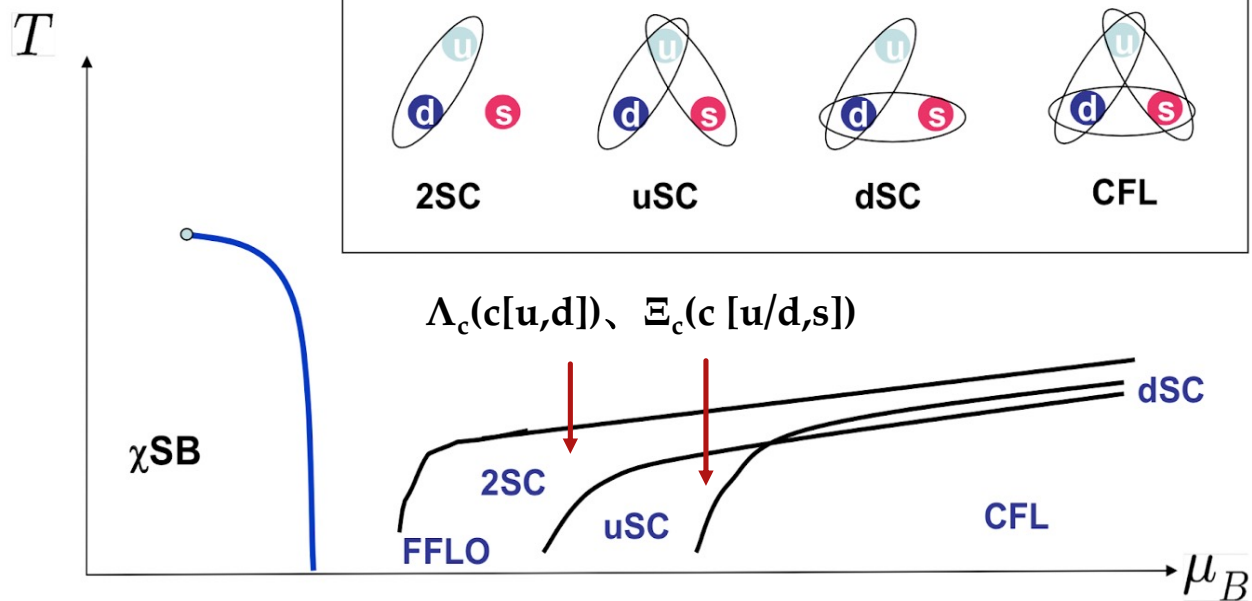
$$\Lambda_c(c[u,d]) \sim \Xi_c^+(c [u/d,s])$$

$$\Lambda_c \sim \Xi_c^0 > \Xi_c^+$$

Enhancement of Λ_c/D at high T
 (→ ALICE, sPHENIX)



Phys. Rev. Lett.100.222301 T [GeV]



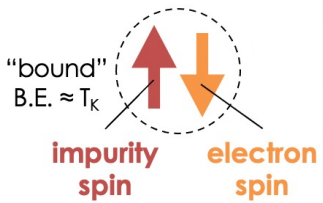
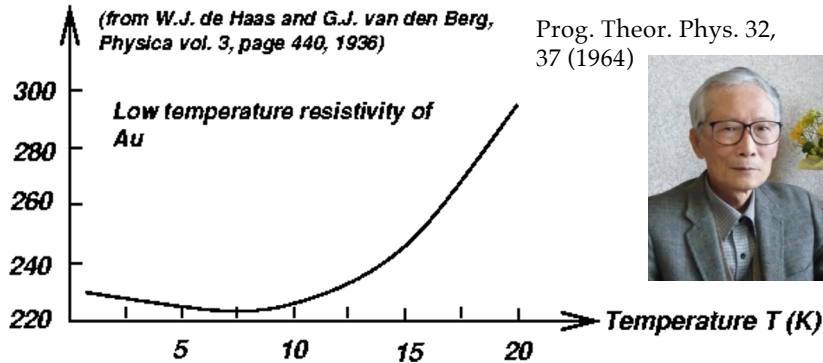
低温高密度クォーク物質の物性

▶ QCD Kondo effect in Quark Matter

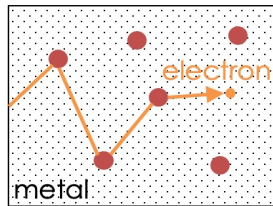
- ▶ 軽いクォークと重いクォーク(不純物)の相互作用が大きくなる
- ▶ 重クォークフローの測定
 - ▶ 臨界点の探索にも有益(drag forceの増大)

J-PARC-HIでの高精度測定

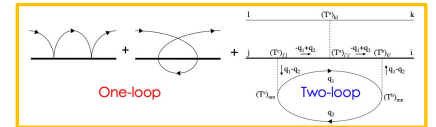
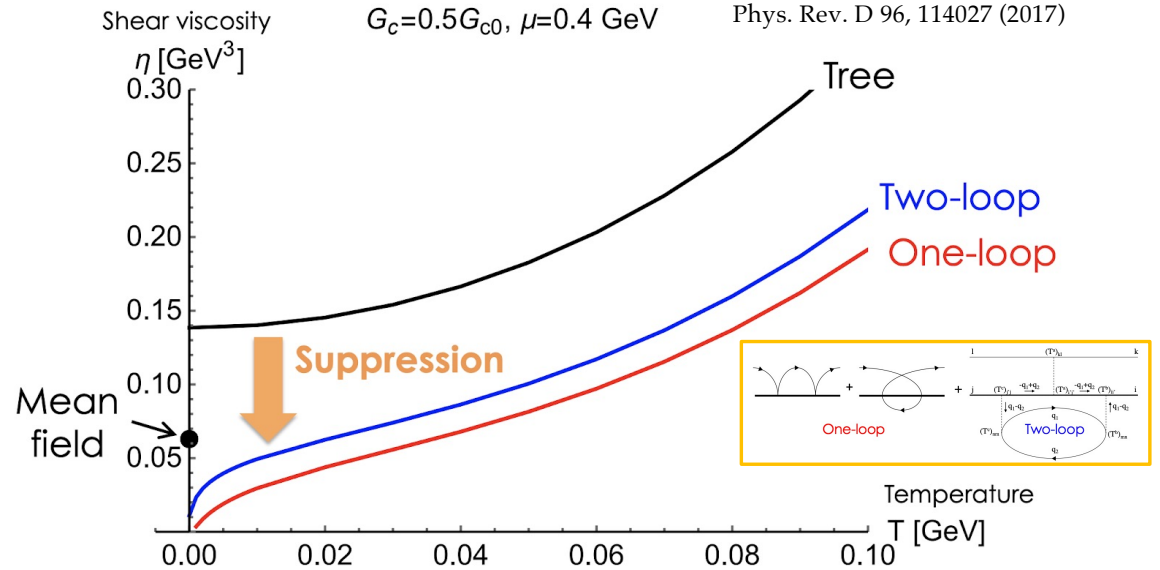
Resistance/Resistance(T=0 Celsius) x 10000



Impurity atom with spin 1/2 with $T^a \cdot T^a$ interaction



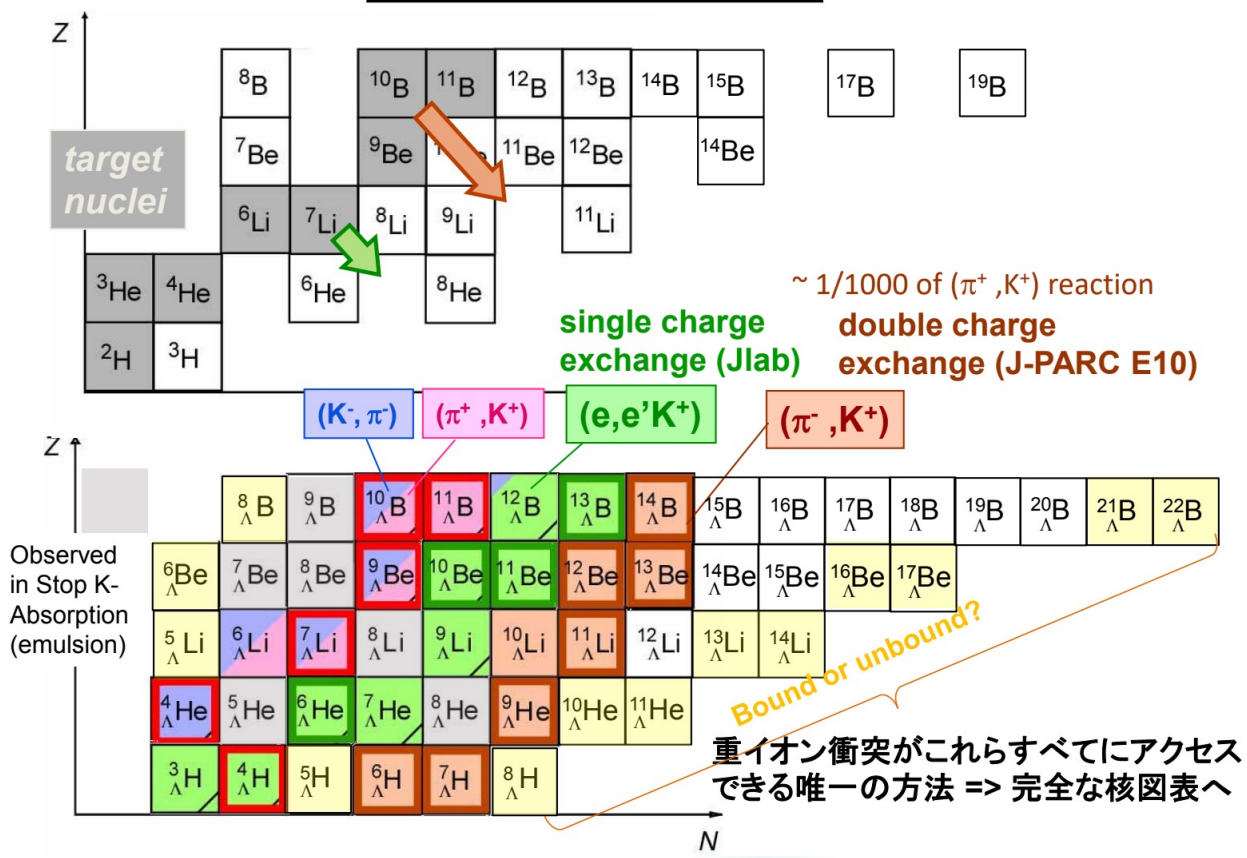
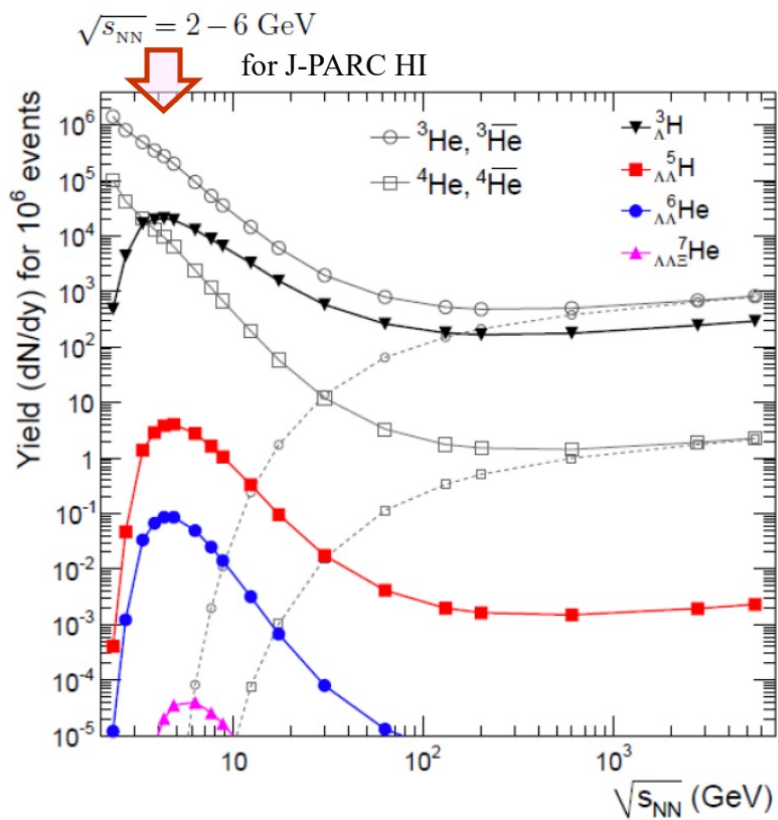
S.Y., S. Ozaki, arXiv:1710.03434 [hep-ph]



ストレンジネス核物理

J-PARC-HIでの新展開

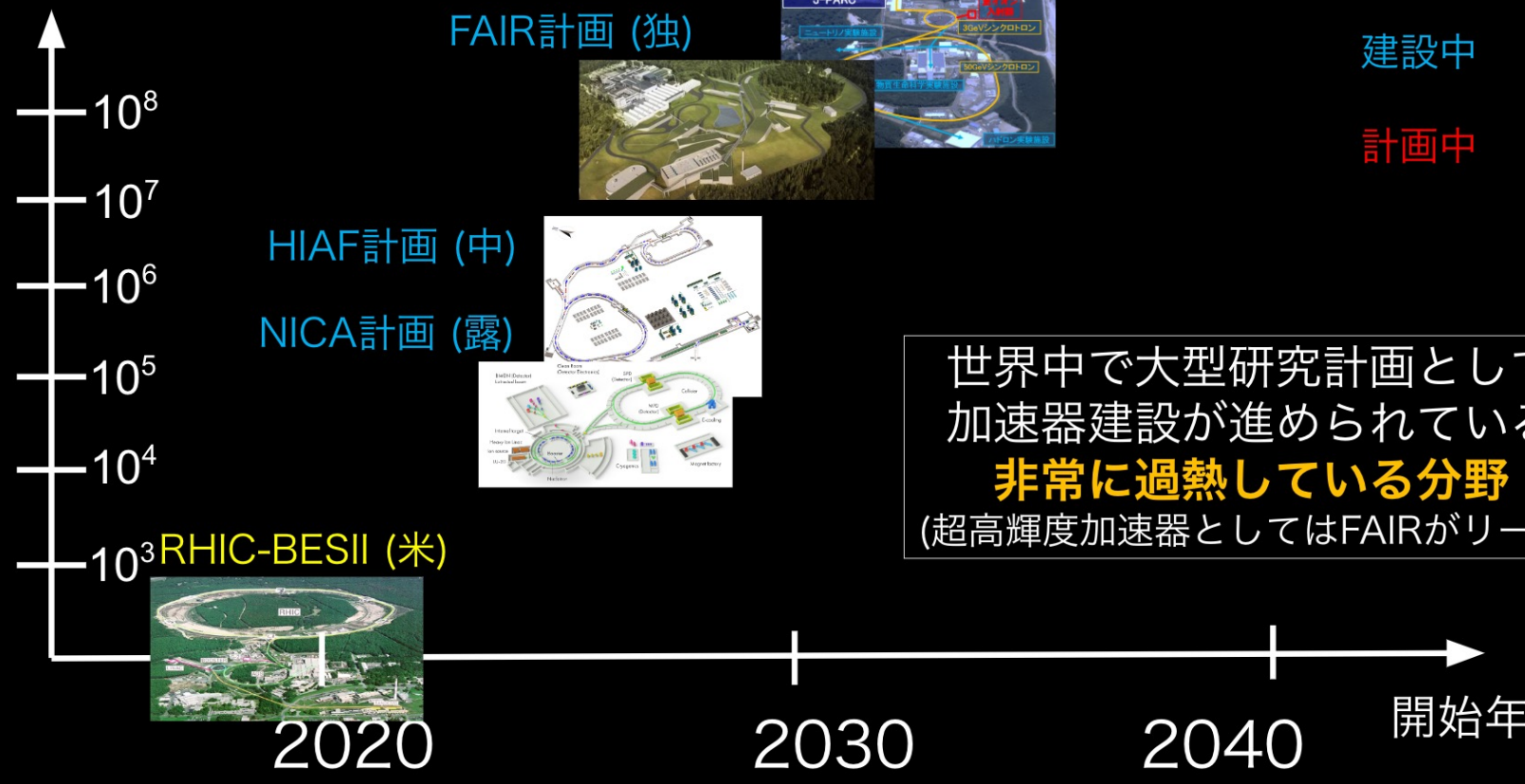
S=-1 核図表の拡大



GeV級重イオン加速器の国際情勢

コロナ前・戦争前

効率：最高衝突率 (Hz)



J-PARC重イオン計画 (日)

稼働中
建設中
計画中

FAIR計画 (独)

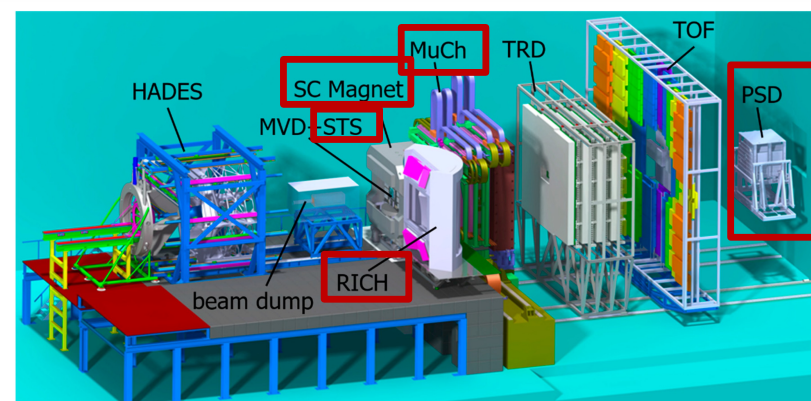
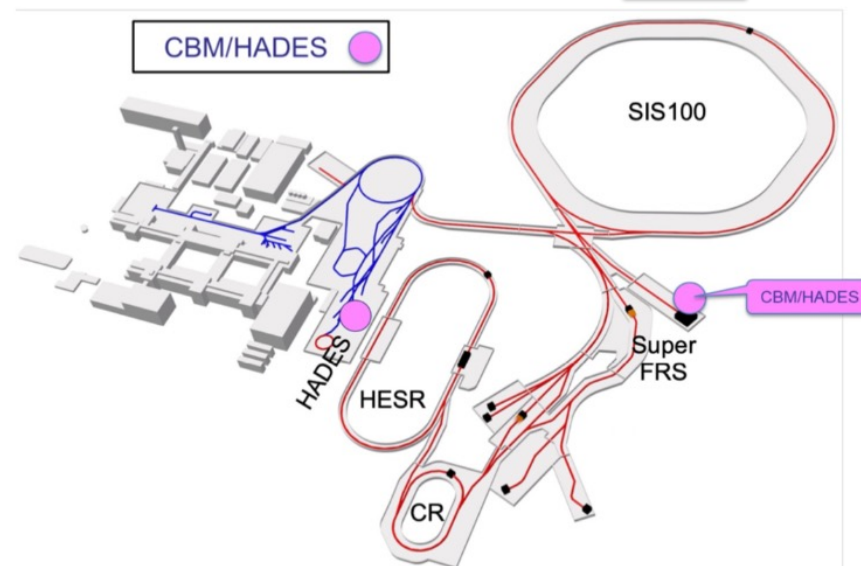
HIAF計画 (中)
NICA計画 (露)

世界中で大型研究計画として
加速器建設が進められている
非常に過熱している分野
(超高輝度加速器としてはFAIRがリード)

FAIRの現状と計画の遅れ

- ロシアのウクライナ侵攻を受けて、**ドイツ政府はロシアとのすべての国際研究協力を中断した**。FAIR計画もこの影響を受けた。
 - SIS100シンクロトロンの超電導磁石はロシアで製作されていたが、まだ多くの磁石はドイツにきていない。
 - 建設費の高騰
- SIS100を含めたFAIR計画見直し案を策定中。9月に明らかになる予定。**
- FAIRのCBM（重イオン実験）は2025年開始の予定であったが、ロシア製のダイポール磁石の再製作を行う等、**2028年末の開始という計画の見直しを始めた。**

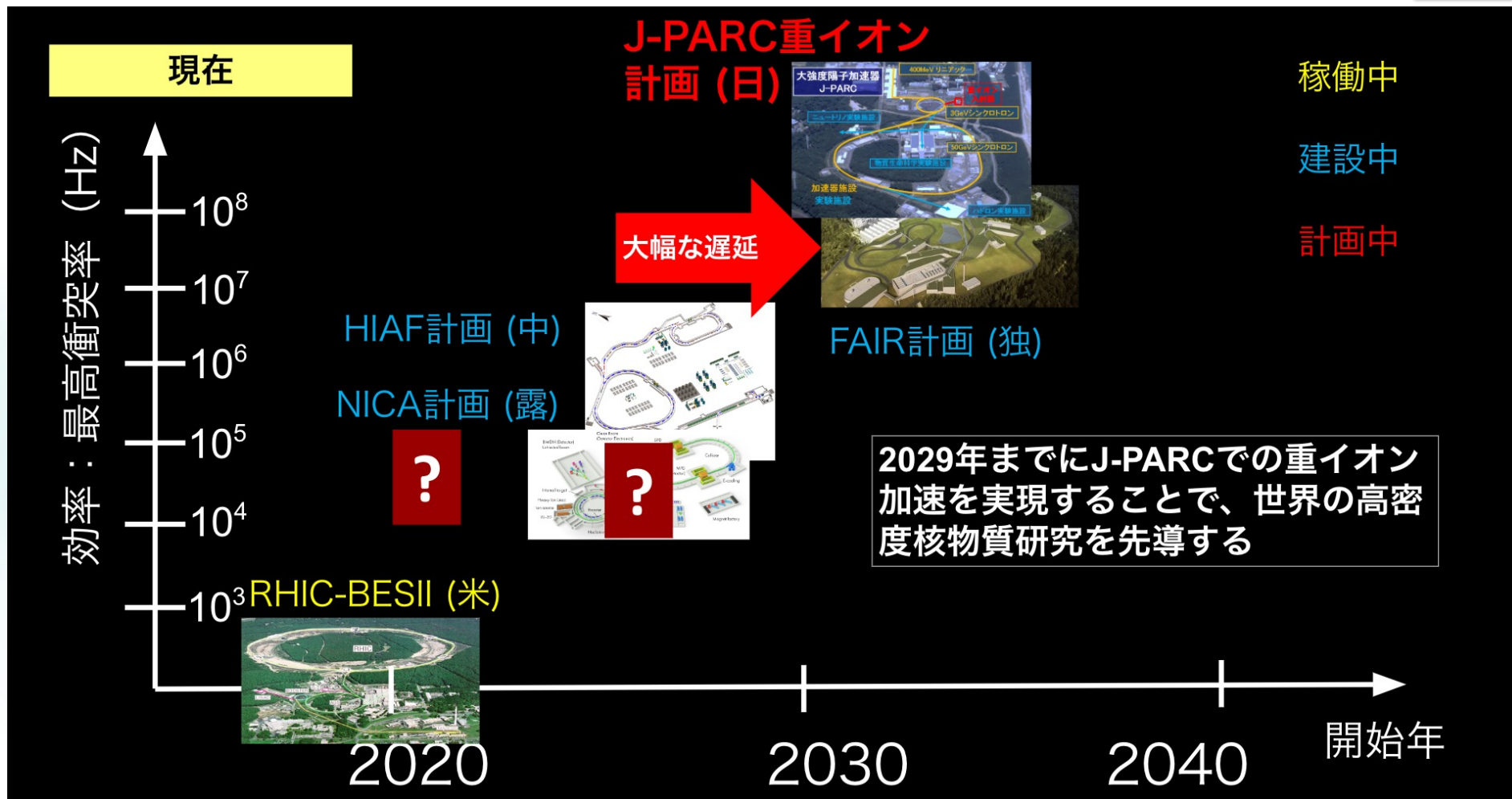
39



J-PARC-HIへのインパクト

- FAIRの遅延に伴い、世界の重イオンコミュニティからJ-PARC-HIの実現を求める声
- J-PARC-HIの議論を開始して以来初めてFAIR-CBMと同時期（～2030年）に開始できる可能性が出てきた。
- 2030年までにJ-PARCでの重イオン加速を実現することで、世界の高密度核物質研究を先導する。

GeV級重イオン加速器の国際情勢



GeV級重イオン加速器の国際情勢



J-PARC-HI : プロジェクト

43

Working Groups

- WG1: Physics
- WG2: Detectors
- WG3: Facility
- WG4: Theory
- WG5: Accelerator
- WG6: Injector Physics
- 総括班



J-PARC-HIの物理を語る夕べ

- 定期的開催
- これまで13回の開催

<https://sites.google.com/view/j-parc-hi-evening/>

134 members :

Experimental

Theoretical

Accelerator Scientists

Experiment

J. K. Ahn, **K. Aoki**, S. Ashikaga, O. Busch, M. Chiu, T. Chujo, P. Cirkovic, T. Csorgo, D. Devetak, G. David, M. Djordjevic, S. Esumi, P. Garg, R. Guernane, **T. Gunji**, T. Hachiya, H. Hamagaki, S. Hasegawa, B. S. Hong, S. H. Hwang, Y. Ichikawa, T. Ichisawa, K. Imai, M. Inaba, M. Kaneta, H. Kato, B. C. Kim, E. J. Kim, X. Luo, Y. Miake, J. Milosevic, D. Mishra, **Y. Morino**, L. Nadjdjerdj, S. Nagamiya, T. Nakamura, **M. Naruki**, **K. Nishio**, T. Nonaka, **M. Ogin**, K. Oyama, **K. Ozawa**, **T. R. Saito**, A. Sakaguchi, T. Sakaguchi, S. Sakai, **H. Sako**, K. Sato, S. Sato, S. Sawada, K. Shigaki, S. Shimansky, M. Shimomura, M. Stojanovic, H. Sugimura, **Y. Takeuchi**, **H. Tamura**, K. H. Tanaka, Y. Tanaka, K. Tanida, N. Xu, S. Yokkaichi, I. K. Yoo

Theory

Y. Akamatsu, M. Asakawa, K. Fukushima, H. Fujii, T. Hatsuda, M. Harada, T. Hirano, K. Itakura, **M. Kitazawa**, T. Maruyama, K. Morita, K. Murase, A. Nakamura, Y. Nara, C. Nonaka, A. Ohnishi, M. Oka

Accelerator

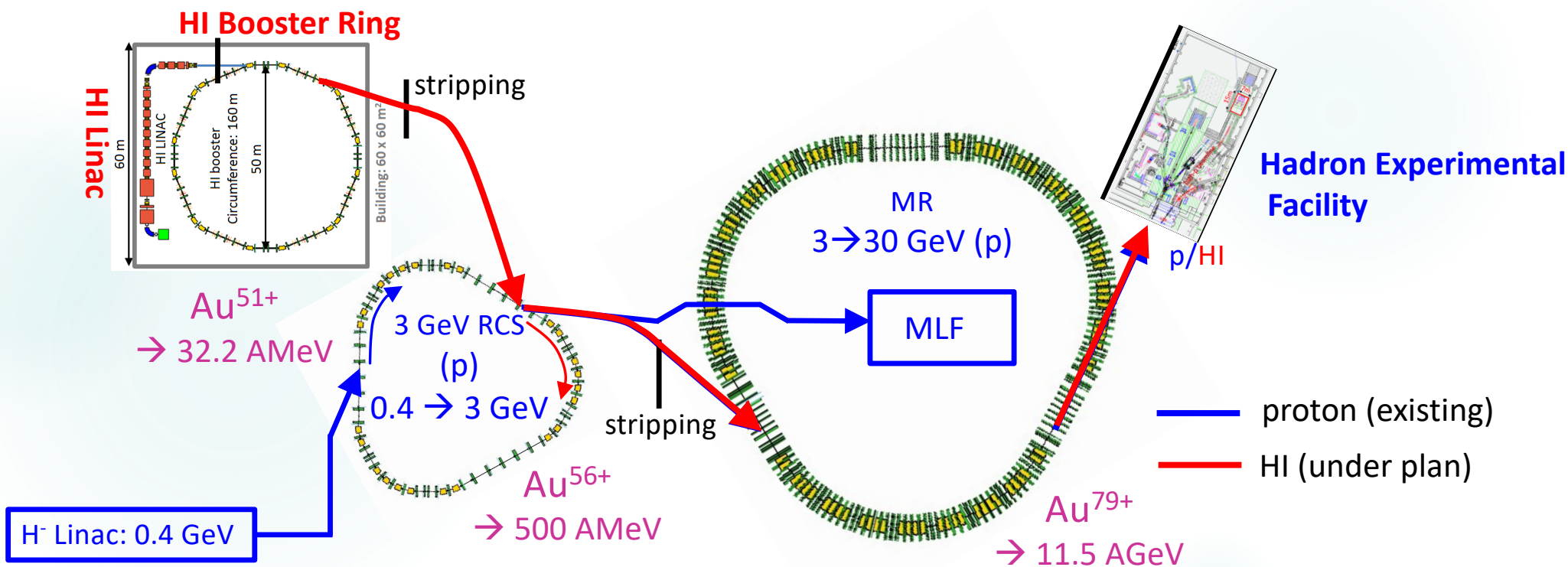
E. Chishiro, **H. Harada**, Y. Hashimoto, N. Hayashi, K. Hirano, H. Hotchi, K. Ishii, T. Ito, M. Kinsho, R. Kitamura, A. Kovalenko, J. Kamiya, N. Kikuzawa, T. Kimura, Y. Kondo, H. Kuboki, Y. Kurimoto, Y. Liu, S. Meigo, A. Miura, T. Miyao, T. Morishita, Y. Morita, K. Moriya, R. Muto, T. Nakanoya, K. Niki, H. Oguri, C. Ohmori, A. Okabe, M. Okamura, P. K. Saha, K. Sato, Y. Sato, T. Shibata, T. Shimokawa, K. Shindo, S. Shinozaki, M. Shirakata, Y. Shobuda, K. Suganuma, Y. Sugiyama, H. Takahashi, T. Takayanagi, F. Tamura, J. Tamura, N. Tani, M. Tomisawa, T. Toyama, Y. Watanabe, K. Yamamoto, M. Yamamoto, M. Yoshii, M. Yoshimoto

ASRC/JAEA, J-PARC/JAEA, J-PARC/KEK, Tokyo Inst. Tech, Hiroshima U, Osaka U, U Tsukuba, Tsukuba U Tech, CNS, U Tokyo, Tohoku U, Nagasaki IAS, Kyoto U, RIKEN, Akita International U, Nagoya U, Sophia U, U Tokyo, YITP/Kyoto U, Nara Women's U, KEK, BNL, Mainz U, GSI, Central China Normal U, Korea U, Chonbuk National U, Pusan National U, JINR, U Belgrade, Wigner RCP, KRF, Stony Brook U, Bhaba Atomic Research Centre, Far Eastern Federal U, Grenoble U

J-PARC-HI : 重イオン加速

HI beam rate $\sim 10^{11}$ Hz (World's highest expected)

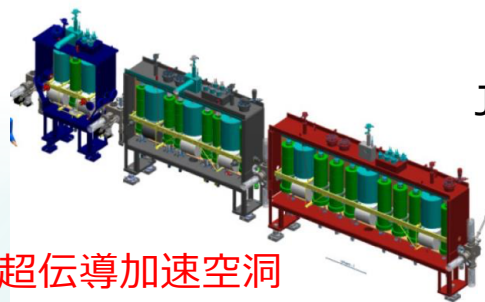
$E_{\text{lab}}(\text{Au}) = 1\text{-}12 \text{ AGeV} \rightarrow \sqrt{s_{\text{NN}}}(\text{Au}) = 1.9\text{-}4.9 \text{ GeV}$



J-PARC-HI : 加速器ステージング

B. 提案したいプロジェクト (期間は設けないがおよそ10年程度まで)

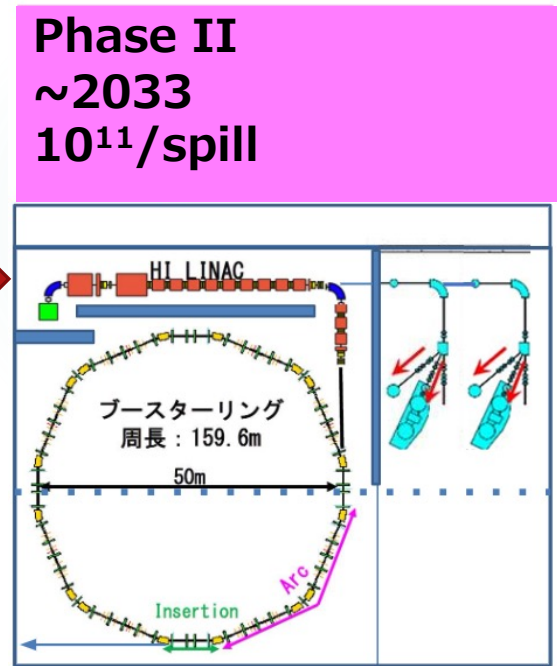
JAEAにおける
重イオンリニアック計画



J-PARCへ移設

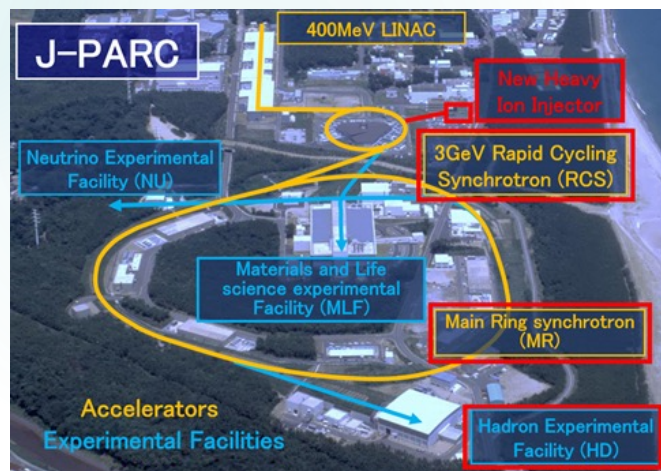


Upgrade

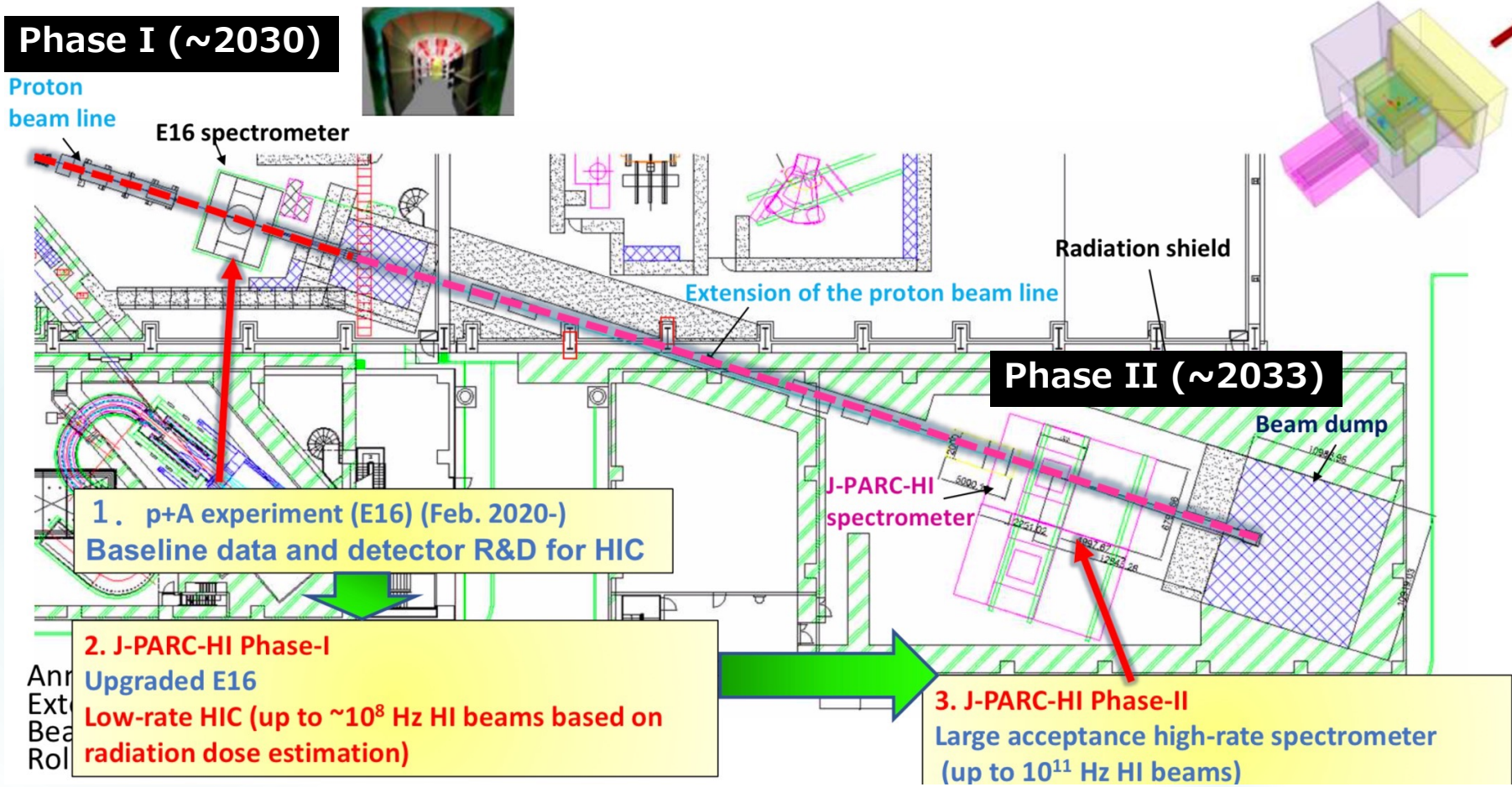


KEK-PS Boosterを移設

新大強度Booster建設

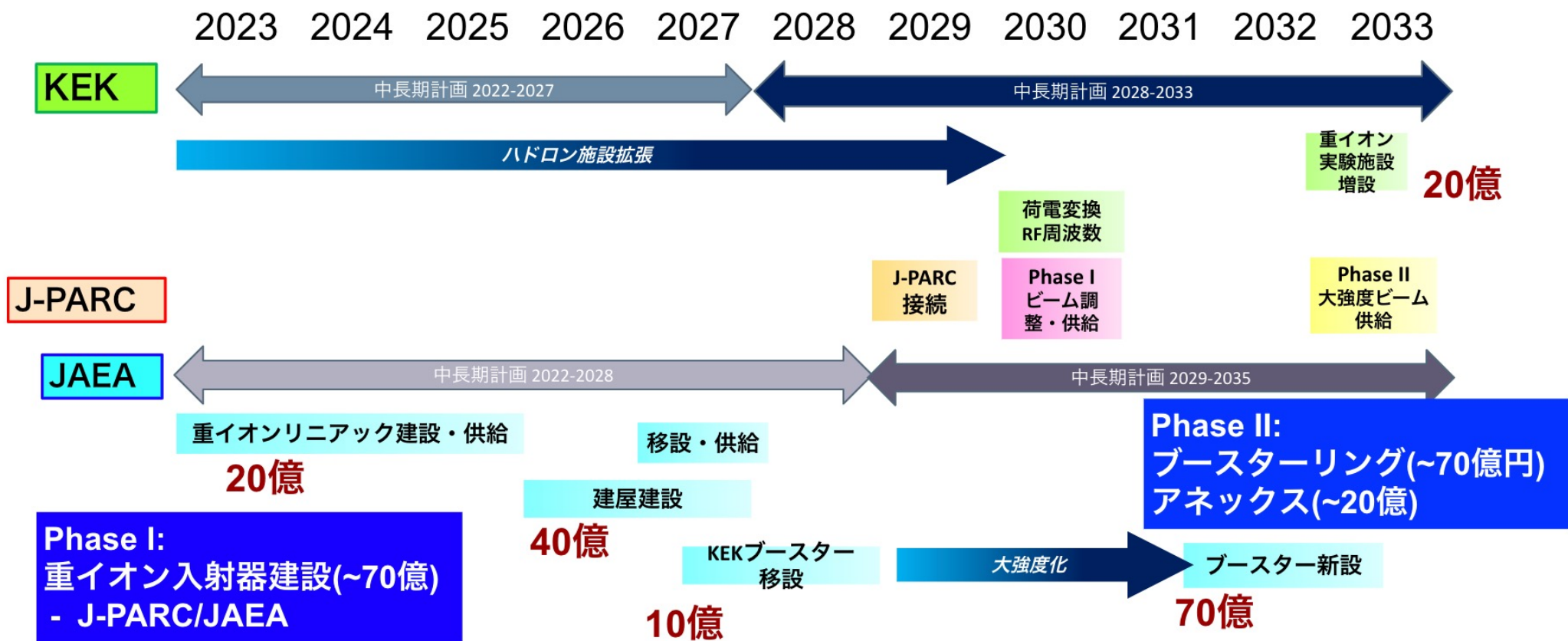


J-PARC-HI : 実験場所



J-PARC-HI加速器：年次計画

B. 提案したいプロジェクト（期間は設けないがおよそ10年程度まで）

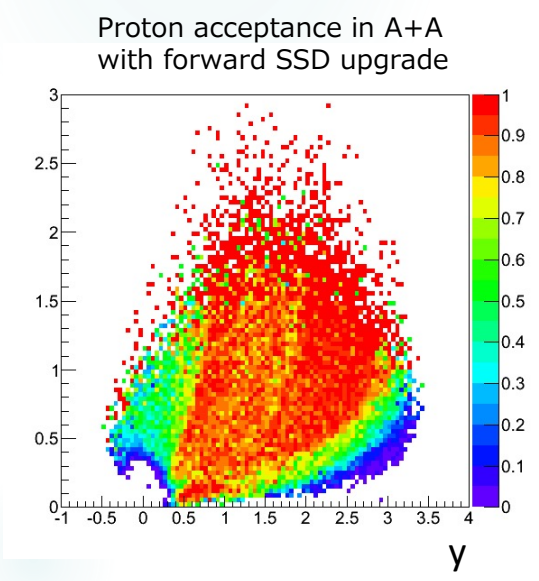
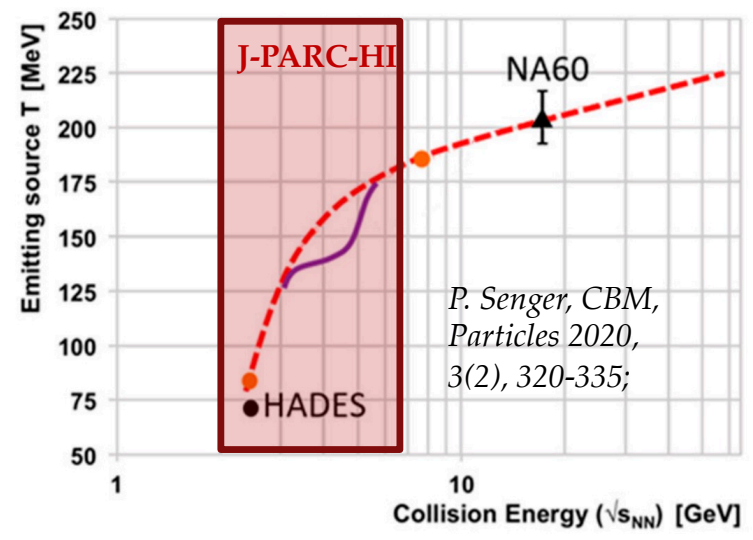
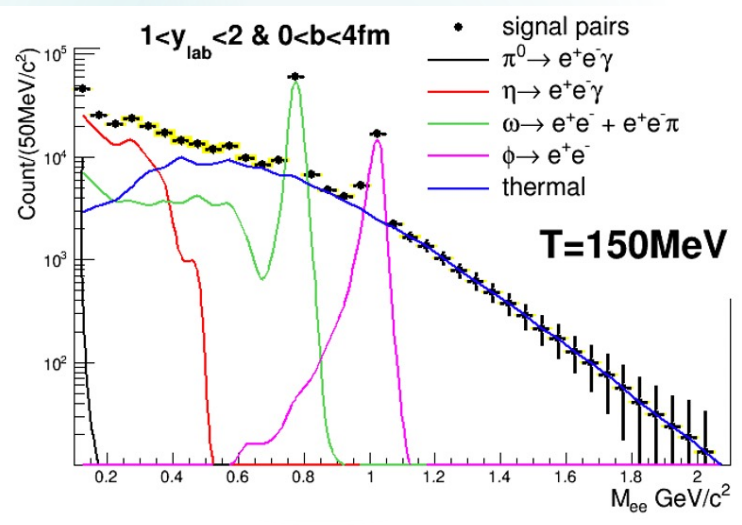
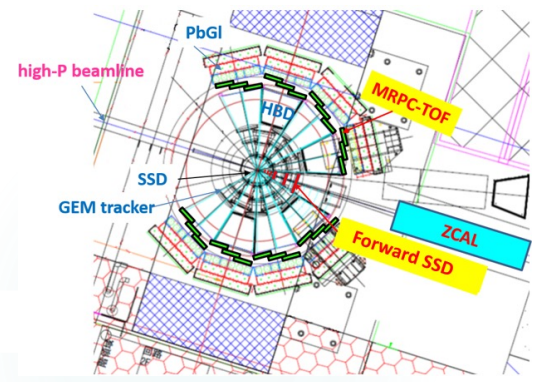


J-PARC-HI実験 (Phase I: 2030~)

B. 提案したいプロジェクト (期間は設けないがおよそ10年程度まで)

▶ E16アップグレードによる電子対&ハドロン測定

- ▶ 10^8 beam/spill, IR rate ~ 50 kHz
- ▶ 中間質量領域($m_{ee} > 1$ GeV) \rightarrow 高密度クォーク物質の温度測定
- ▶ 衝突エネルギーの走査: 1次相転移の探索 (coloric curve)
- ▶ E16測定器の高度化に5億円 (国際協力、競争的資金)



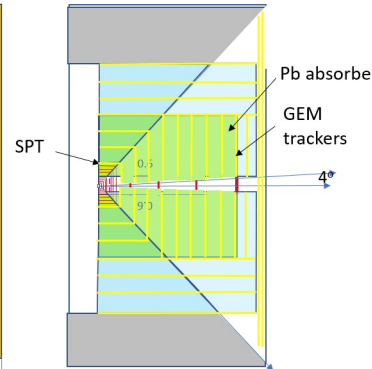
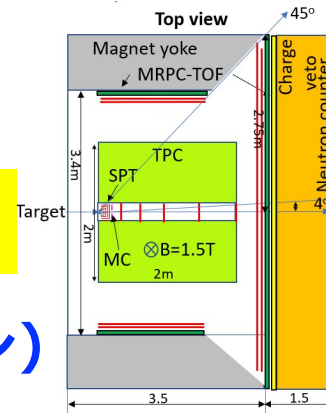
J-PARC-HI実験 (Phase II: 2033~)

- B. 提案したいプロジェクト (期間は設けないがおよそ10年程度まで)
- C. 20~30年先を見据えた将来の構想や目標

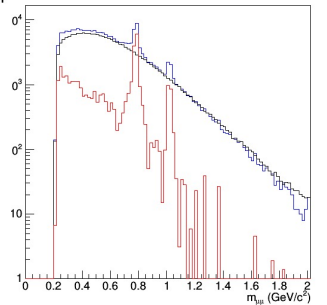
▶ 高レート用新スペクトロメータの建設

- ▶ 高次の揺らぎ測定
- ▶ 低質量低運動量レプトン対
- ▶ 低運動量重クォーク(メソン、バリオン)
- ▶ ハドロン測定、ストレンジネス測定

CBMでは
難しい測定



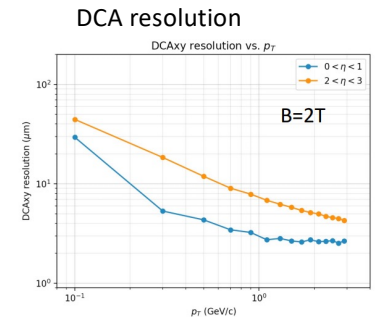
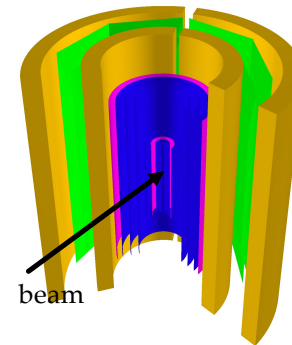
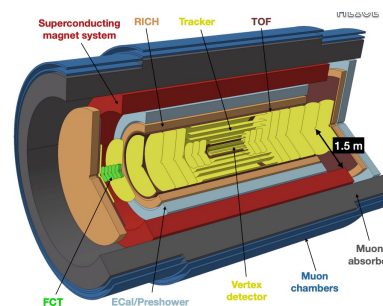
J-PARC-HI simulation, U+U
 $\sqrt{s_{NN}}=4.5$ GeV, Min-bias (54k)
Di-muon spectrum



CBMと相補的、かつ、ユニークな実験(カラ
ー超伝導相に感度を持つ実験)

現在、磁石+検出器案を検討中

ALICE 3 like compact Solenoid and dipole detectors

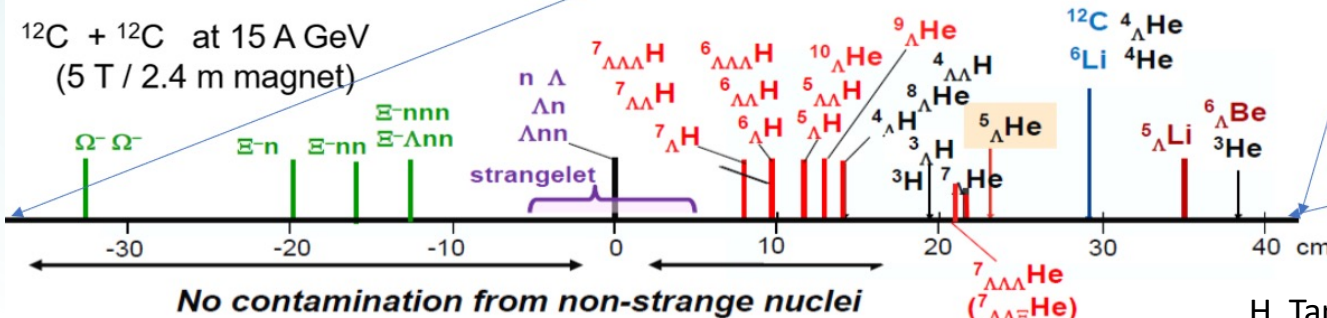
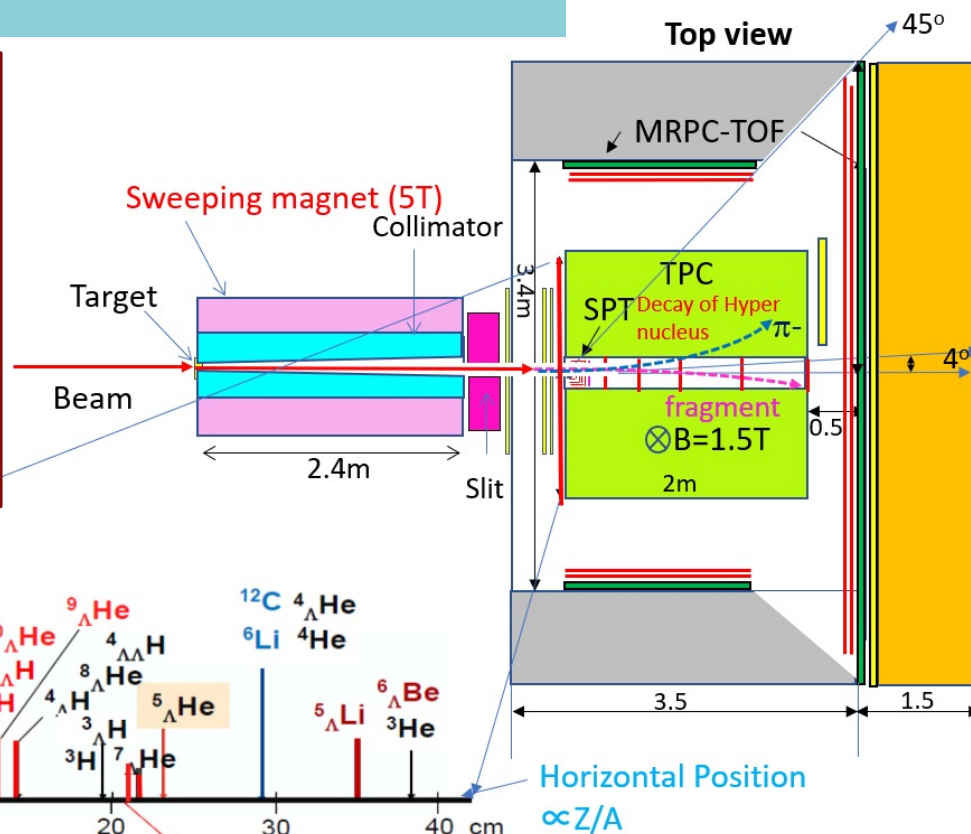


ストレンジネス実験

B. 提案したいプロジェクト（期間は設けないがおよそ10年程度まで）

C. 20~30年先を見据えた将来の構想や目標

- Q/A (rigidity) を使ってBGを圧倒的に落とす
- ビーム核種・標的核種を最適化し、Q/Aを選ぶことで、ハイパー核ビームが作られる
- S=-1核図表の拡張
- エキゾチックストレンジ核物質の探索 (Strangelet, MEMO)
- 核内 Λ の磁気モーメントと核内バリオンの性質変化



実施機関

マスタープラン2023
(希望)

提案者
J-PARC

実施機関

J-PARC(JAEA/KEK)

参加機関

原子力機構先端研・東大CNS・筑波大・広島大・奈良女子大・
長崎総科大・京大・阪大RCNP・東北大・理研
高密度物質・ストレンジネス研究

阪大・名大・上智大・
国際教養大・京大基研・理研・
東大・広島大
理論研究

まとめ

- ▶ **高密度QCD = 重イオン物理の新たな潮流**
 - ▶ 臨界点、一次相転移、カラー超伝導相、クォークグルーオン相
 - ▶ RHIC-BES-Iでは未だ兆候は見えず → RHIC-BES-IIと**高輝度実験**に期待
 - ▶ **FAIR: 流動的な実験計画**
 - ▶ CBMは2028-2029頃を新たな開始年に設定
 - ▶ **コミュニティからJ-PARC-HIに期待する声**
 - ▶ 2030年頃に開始できれば、世界を先導できる可能性。
 - ▶ **加速器計画+測定器計画を立案中**
 - ▶ 加速器: 新LINAC+KEK PS booster (Phase-I, 70億), 新booster (Phase-II, 90億)
 - ▶ 実験: E16 upgrade (Phase-I), J-PARC-HI spectrometer (Phase-II、CBMと違う視点)
 - ▶ **実施機関**
 - ▶ J-PARC (JAEA/KEK)に向けて、調整を進めていきたい
- ハドロンホール拡張計画の次の最重要プロジェクトに!!
(高密度QCD+ハドロン+ストレンジネス物理)