

核融合中性子源A-FNSのための 大電流重陽子加速器の概念設計

量子科学技術研究開発機構 六ヶ所核融合研究所

増田 開、春日井 敦、佐藤 聡、落合 謙太郎、太田 雅之、
小柳津 誠、権 セロム、長谷川 和男、坂本 慶司、石田 真一

第17回日本加速器学会年会

2020年9月2日（水）

『A-FNS大電流重陽子加速器の概念設計』

1. A-FNS計画、IFMIF計画とLIPAc
2. A-FNS加速器の構成、仕様と課題
3. 設計の見直し
4. まとめ

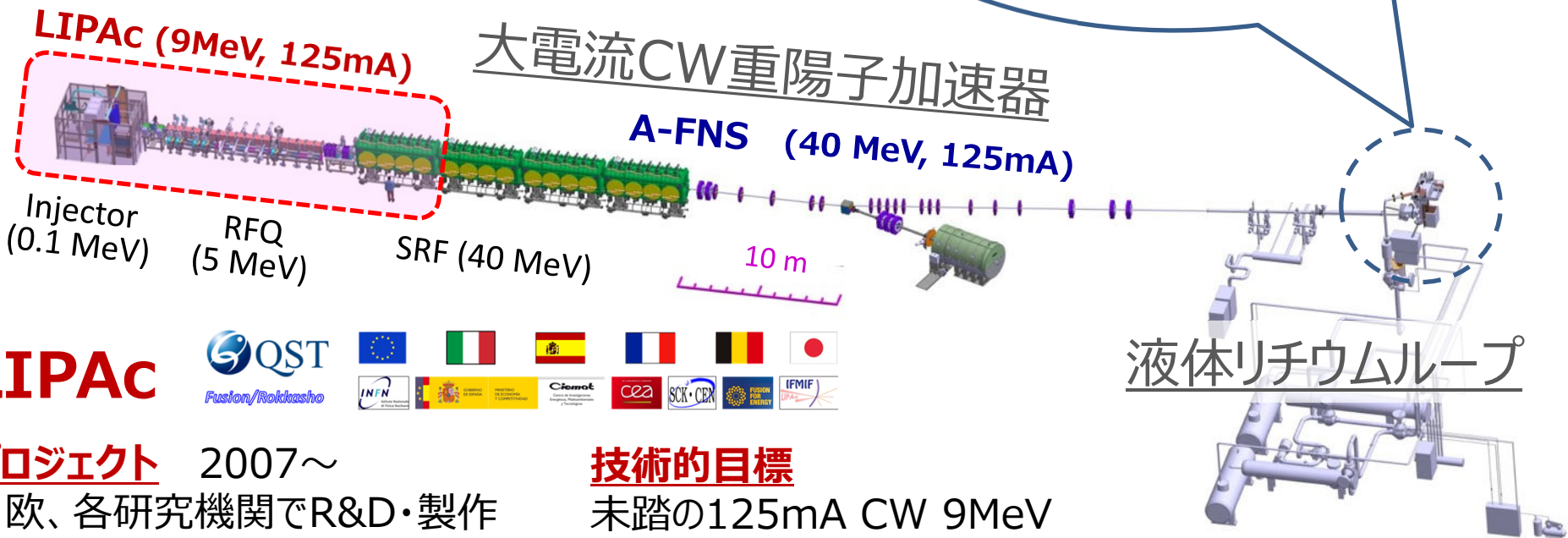
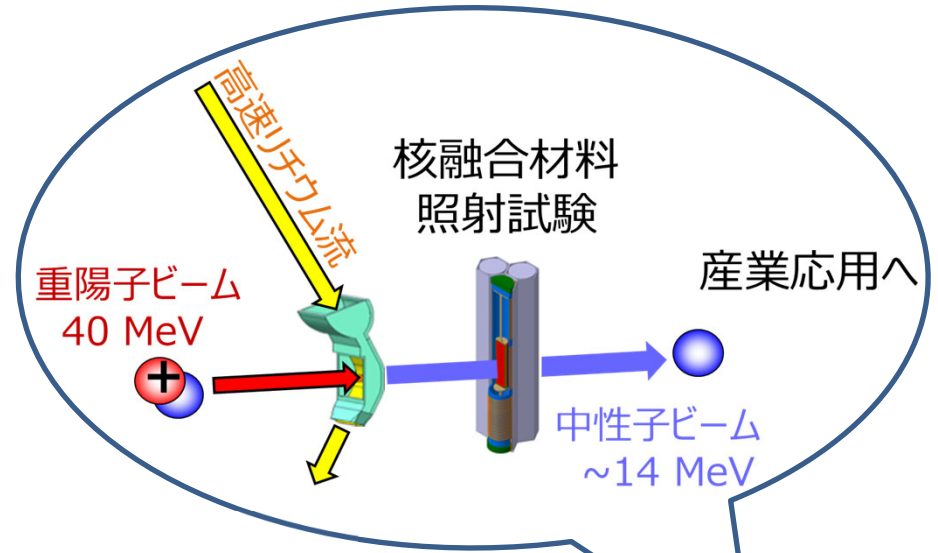
A-FNS計画

春日井他 TH0004

ミッション 核融合原型炉の建設判断に必要な中性子照射データを2035年頃までに取得

応用利用 新たな産業基盤形成『ニュートロンフォレスト』構想の中核を担う中性子利用施設

プロジェクト IFMIF工学設計・工学実証活動の成果を活かす。国内計画。



LIPAc



プロジェクト 2007～
日欧、各研究機関でR&D・製作
QST六ヶ所研サイトで据付・試験

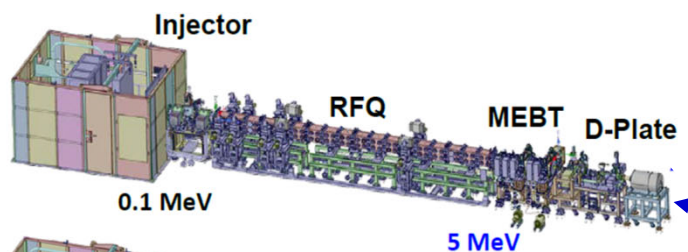
技術的目標
未踏の125mA CW 9MeV
重陽子ビーム加速の実証

LIPAcの状況



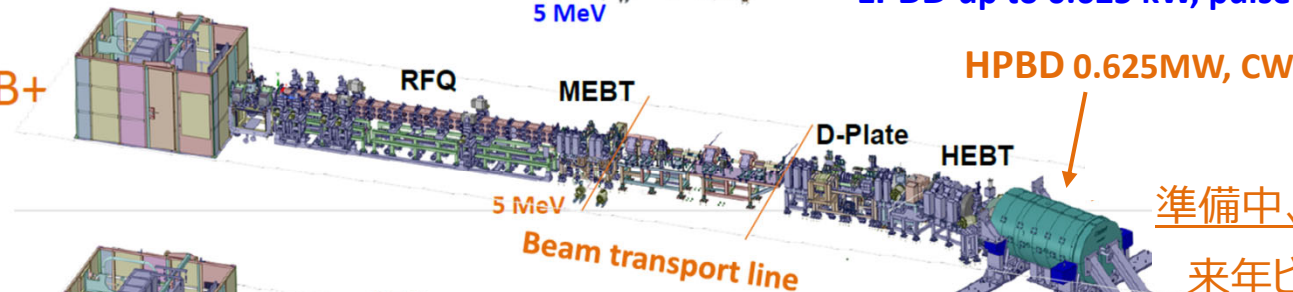
2018/06 1st proton beam
 2019/03 1st deuteron beam
2019/07 125 mA d-beam [1]

Phase-B
 昨年まで



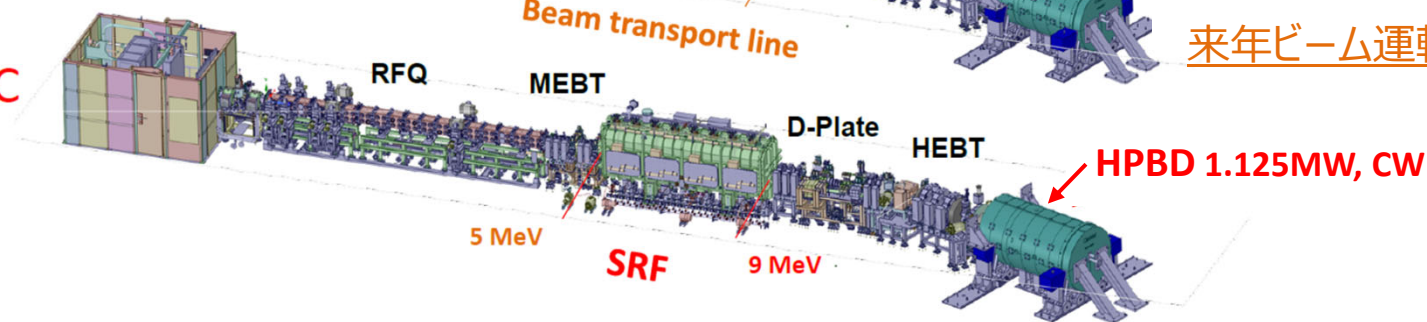
LPBD up to 0.625 kW, pulse (10^{-3} duty)

Phase-B+
 現在



準備中、機器設置は完了 [2-4]
 来年ビーム運転開始予定

Phase-C
 今後



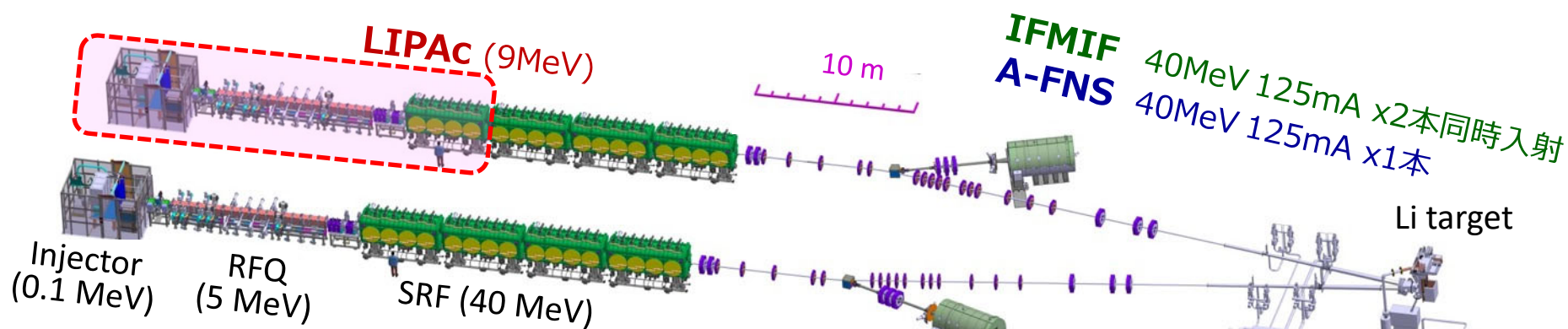
2019/03 SRFアセンブリ開始 [5]



- [1] 近藤他 PASJ2019-THOH11
- [2] 熊谷他 PASJ2019-FRPI050
- [3] 下崎他 PASJ2019-FRPI055
- [4] 下崎他 **PASJ2020-THPP01**
- [5] 蛭沢他 PASJ2019-FRPI003

A-FNS加速器設計 経緯 と 今後の計画

- 2013 IFMIF 中間 工学設計 報告書 [1]
- 2019 LIPAc (IFMIF原型加速器) Phase B 5MeV、125mA
10⁻³ duty
- 2019まで A-FNS 概念設計活動
- 2020 A-FNS 概念設計書 公開予定 ← IFMIF踏襲、課題同定
- 2021以降 A-FNS 工学設計
LIPAc Phase B+、C、D } ← 設計の見直しも
- 2025 A-FNS建設開始
- 2030 A-FNS照射運転開始

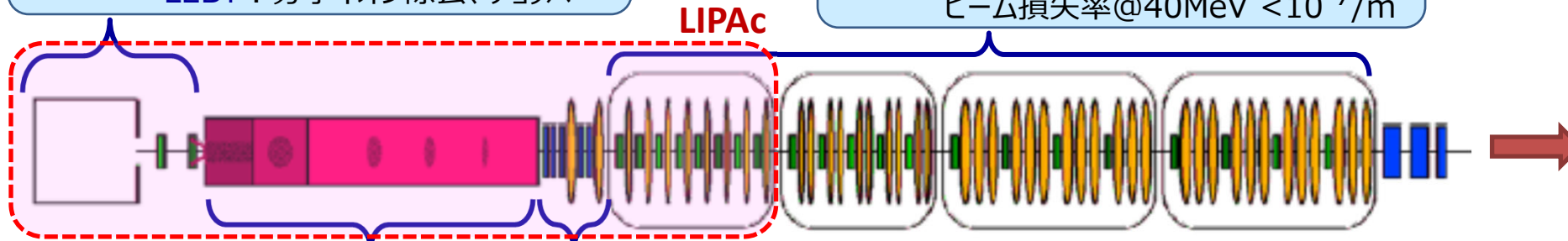


[1] IFMIF/EVEDA Integrated Project Team, "Intermediate Engineering Design Report", June 2013.

A-FNS加速器／LIPAc の構成と仕様

入射器 ECRイオン源 : 80% D⁺, 140 mA
 静電加速 : 100 kV dc
 LEBT : 分子イオン除去、チョッパ

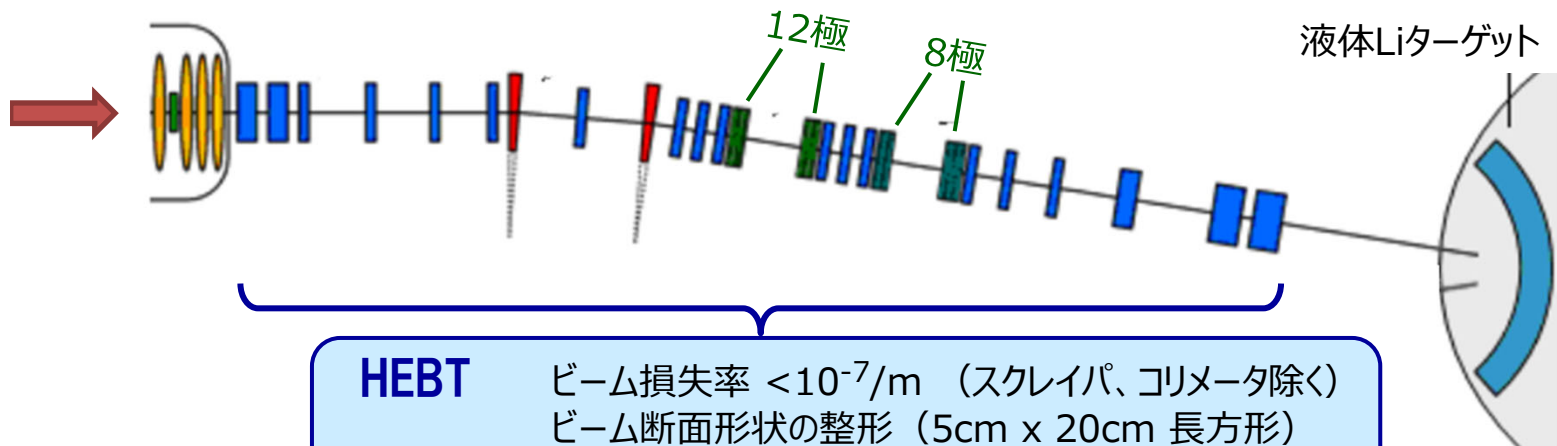
SRF 5 → 40 MeV, 125 mA, 175MHz
 ビーム損失 < 1W/m
 ビーム損失率@40MeV < 10⁻⁷/m



RFQ 0.1 → 5 MeV, 175MHz
 透過率96%, 133 mA (125mA+5%マージン)
 ビーム損失 < 5mA (< 0.1mA @4-5MeV)

MEBT x/y-スクレーパ、バンチャ2台

CW、beam availability > 87%



HEBT ビーム損失率 < 10⁻⁷/m (スクレイパ、コリメータ除く)
 ビーム断面形状の整形 (5cm x 20cm 長方形)
 Li 蒸気の逆流阻止

LIPAcで取り組む主な課題 …… 今後の高デューティ/CW運転、SRF導入

- Beam availability >87% の充足
 - Beam trip rate < 4.5% LIPAcでの達成(実証)を目指す
 - Hardware availability > 91% 評価、保守ニーズの同定
 - 計画保守期間：1月+3月 保守計画
- RFQ他の放射化

その他の課題

- SRF空洞へのLi蒸気の影響
- SRF Linacにおけるビーム損失率要求の充足

課題認識

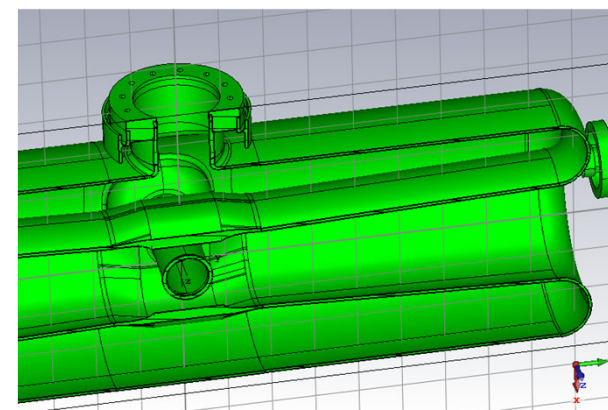
- Li蒸気コンタミによるSRF空洞の性能劣化が懸念される。
- 許容Li量を決定するための知見が不足している。

必要なstudy

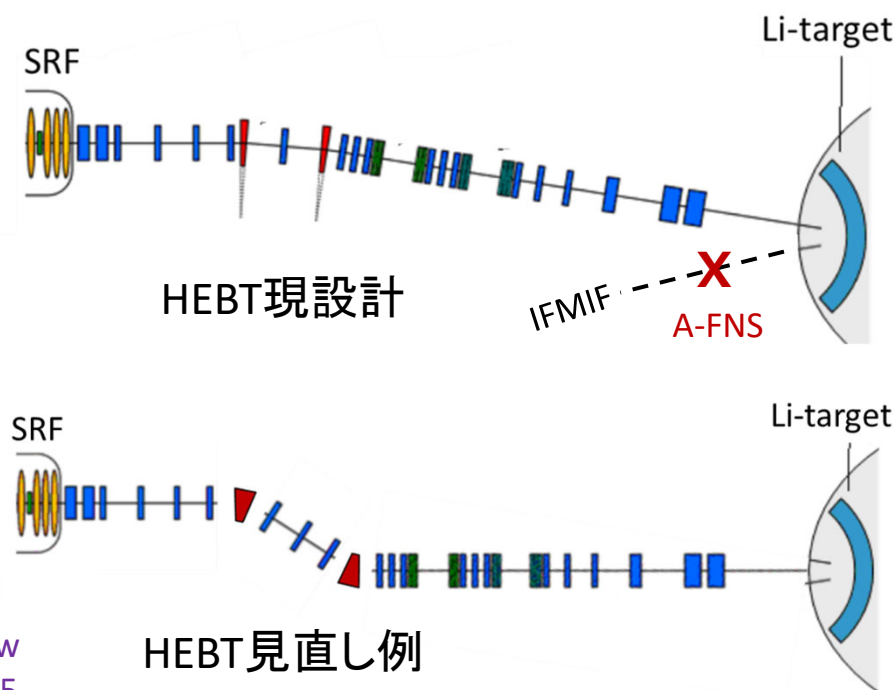
- Li蒸気暴露試験による影響評価

現在の状況

- SRF空洞の工学設計に前倒しで着手
- HEBT内のLi蒸気輸送計算
 - Li蒸発量は試験結果[1]を利用
 - SRFへの流入 ~30 ng/yr
 - 屈曲点からの再蒸発が支配的
- HEBTの見直しとその効果を検討中



HWR型SRF空洞



[1] T. Kanemura et al., "Completion report of validation of li flow measurement and monitoring on EVEDA Li Test Loop", Jan. 2015.

ビーム損失率の要求 と ハロー解析の必要性

- ビーム損失 < 1 W/m
- ビーム損失率 < 10^{-7} /m @40 MeV
- LIPAcでの実証はできない
LIPAcのSRFは上流の1/4、9 MeVまでしかない。
- 解析手法・ツールの検証は必要
LIPAcのSRFにμロスモニタの設置を検討中。

しかしながら、

- 解析手法・ツールと解析結果は、**未だ、検証できるほどに十分ではない。**
 - ✓ 『最大 10^7 個程度のマクロ粒子で数個のロス』
 - $10^9 - 10^{10}$ 個のマクロ粒子数が必要。
 - 10^9 個、数千並列計算でも数週間見込み。
 - ✓ 『 3σ エンベロープが余裕をもってクリア (右図)』
 - 5.7σ のクリアが必要 (ガウス分布の場合)
 - そもそもハロー粒子はコアの分布に従うのか？

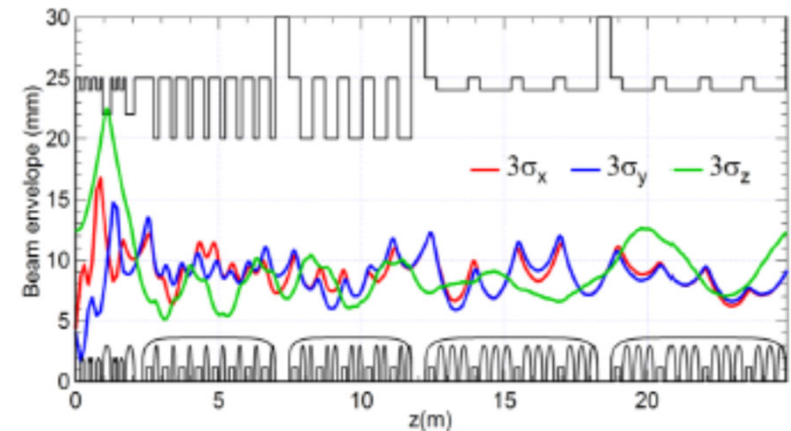


Figure 7-4: Beam envelope (3 rms) along the MEBT and the SRF-Linac

IFMIF設計における解析結果[1]

[1] IFMIF/EVEDA Integrated Project Team, "Intermediate Engineering Design Report: Annex VII", June 2013.

課題認識

- 現設計での要求充足の見通しは、未だ示されていない。
- 既存の解析手法・ツールでは、見通しを示すことは難しい。

必要なstudy

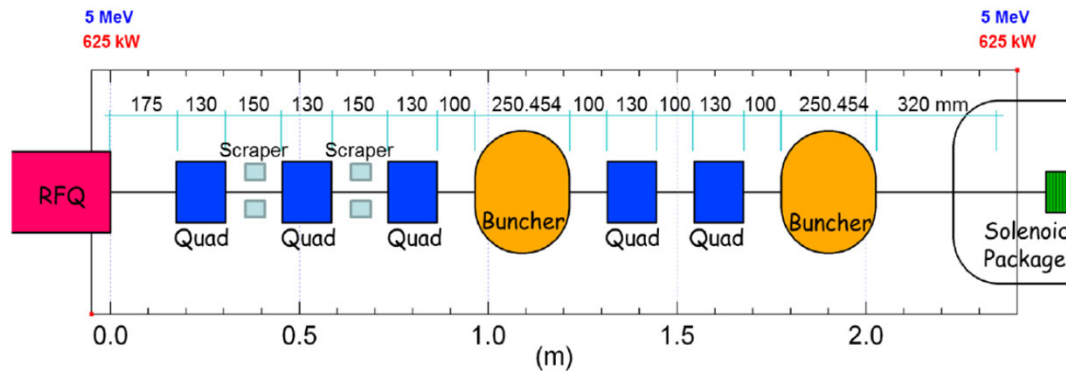
- 設計の見直し (safer alternativeの検討)
- ハロー解析手法の開発

現在の状況

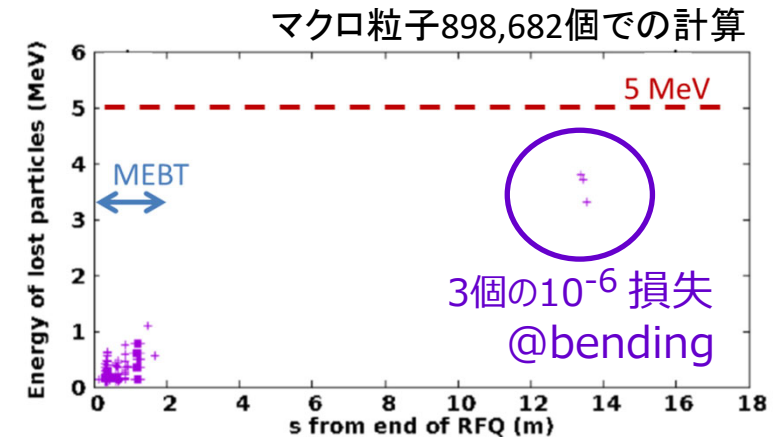
- MEBTへのエネルギーフィルタ導入の検討
- ハロー「輸送」解析の検討
 - 解析的アプローチ [1]
 - ✓ コア分布仮定(ガウシアン)
 - ✓ 数分の高速計算
 - ✓ 設計計算、パラメータ・サーベイ
 - 不均等荷重マクロ粒子
 - ✓ コア分布の仮定不要
 - ✓ 数日～数週 (それでも百～千倍の高速化)
 - ✓ 設計の確認、評価
- ハロー「発生」源の同定/想定が課題

[1] 蛭沢他 private communication

- MEBTの現設計では、エネルギーフィルタ機能は Qの色収差のみ（左下図）
- Off-energy粒子がMEBT出口まで輸送される場合がある（右下図）



MEBTの現設計



LIPAc Phase B+ の計算例

下崎他 THPP01

今後の方向

- エネルギーフィルタの必要性検討：Off-energy粒子の輸送計算
ハローになるのか？ 損失するのか？
- 並行して、エネルギーフィルタ(ドッグレッグまたはシケイン)を備えたMEBTの設計
 - ±100keV程度が理想。課題は、大きなビームサイズ~10mm と 顕著な空間電荷効果。
 - ビームダンプも設けて、SRF Linac入射前に上流の調整を可能とすることも検討。

『現設計は、**未だ**、IFMIF加速器と同じ』

加速器への要求は、IFMIFと同じ

現設計は、IFMIF中間工学設計報告書に基づく

LIPAcにおいて、Phase B（RFQ出口）まで、順調にマイルストーン達成

LIPAcでの今後の工学実証 Phase C、D

高デューティ/CW運転、SRF Linacの設置

⇒ 工学設計レベルでの改善、課題克服

概念設計変更を必要とするかもしれない課題：

- SRF空洞へのLi蒸気影響 ← 『液体Liターゲット』
- ビーム損失率要求の充足 ← 『大電流CW』『重陽子』