



ビームダイナミクスWG 活動報告

ERLビームダイナミクスWG
(発表) KEK物構研 坂中章悟

November 14, 2006, ERL検討会

ERL実証機

ERL実証機の役割

- 重要コンポーネントのビームを使った試験
 - 電子銃、超伝導空洞
- 超低エミッタンスビームの生成と加速、エミッタンス保存
- 大電流ビームの周回試験(100 mA)
- 加速器物理の実証研究 : コヒーレント放射(CSR), ビーム損失比率、ビーム不安定性、イオン捕獲、など

当面検討すべき課題

- 入射器、合流部の最適設計 (空間電荷効果補償など)
- 周回部のラティス設計、最適化、建物との整合性
- ビーム不安定性
- バンチ圧縮方式の最適化 (最短バンチ、最小エミッタンス)

これまでの主な検討事項

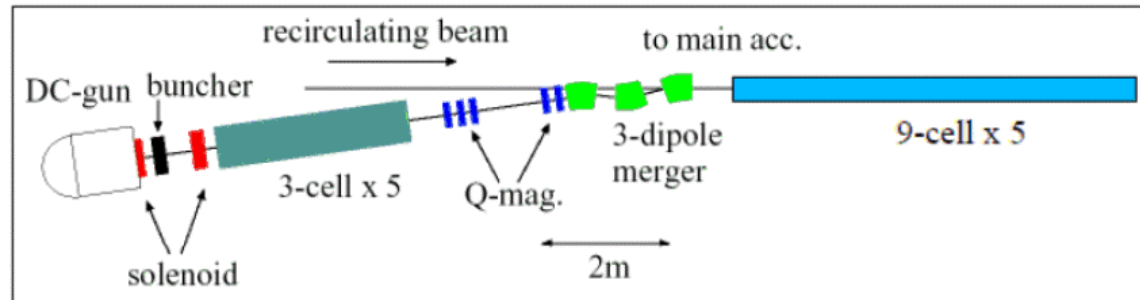
ERL実証機

- 入射器シミュレーション(宮島)
- 実証機ラティス設計(原田、小林)
- 建物内の配置検討(長橋)
- コヒーレント放射光
 - ERL周回部におけるCSR(吾郷)
 - (旧)ERL Test Facility のバンチ圧縮の最適化(島田)
- ビーム不安定性
 - HOM-BBUの解析(羽島、永井) -- 実用機、ERL向け空洞
 - (旧)BBUの検討結果(菖蒲田)
 - Resistive-wall multi-bunch beam breakup(中村)
 - イオン捕獲(坂中)

これまでの検討結果はERL推進室のウェブページに掲載
<http://pfwww.kek.jp/ERLoffice/info/wgsiryou/wgsiryo.html>

入射器シミュレーション(宮島)

1. JAEA型入射器の再現計算 (Parmela)



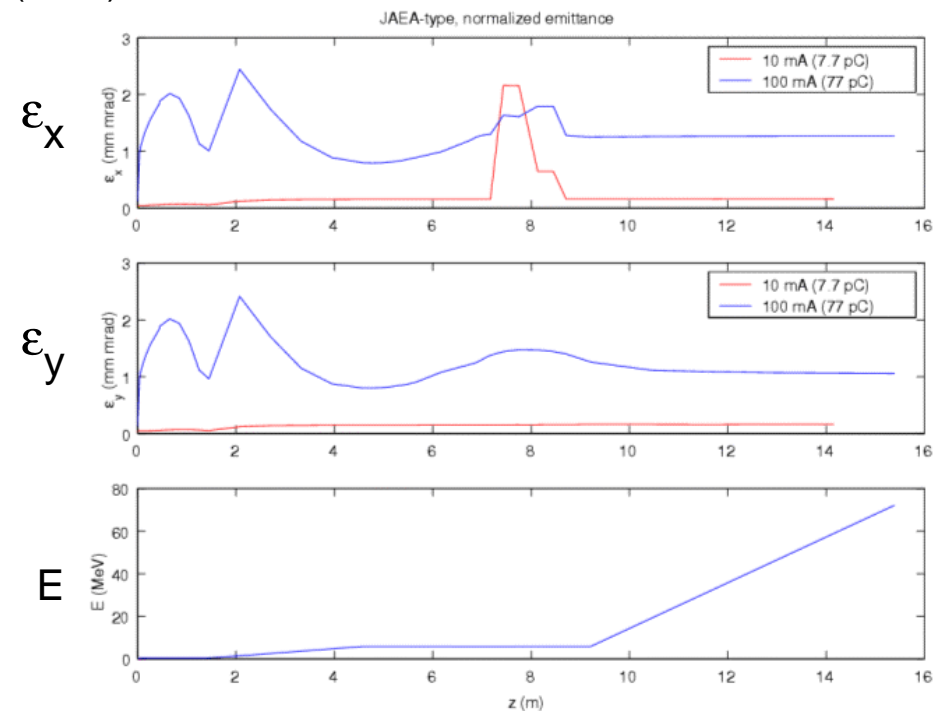
R. Hajima *et al.*, NIM-A557, 103-105 (2006)

構成

- DC電子銃 500kV
- ソレノイド、バンチャー、ソレノイド
- 3-cell加速空洞 × 5 (1.3 GHz)
→ 2-cellに変更する可能性
- トリプレット4極、ダブレット4極
- マージャー(入口でのエネルギー 5.8 MeV)
- マージャー入口までの距離: 7.17 m
- 電流: 100 mA (77 pC × 1.3 GHz)

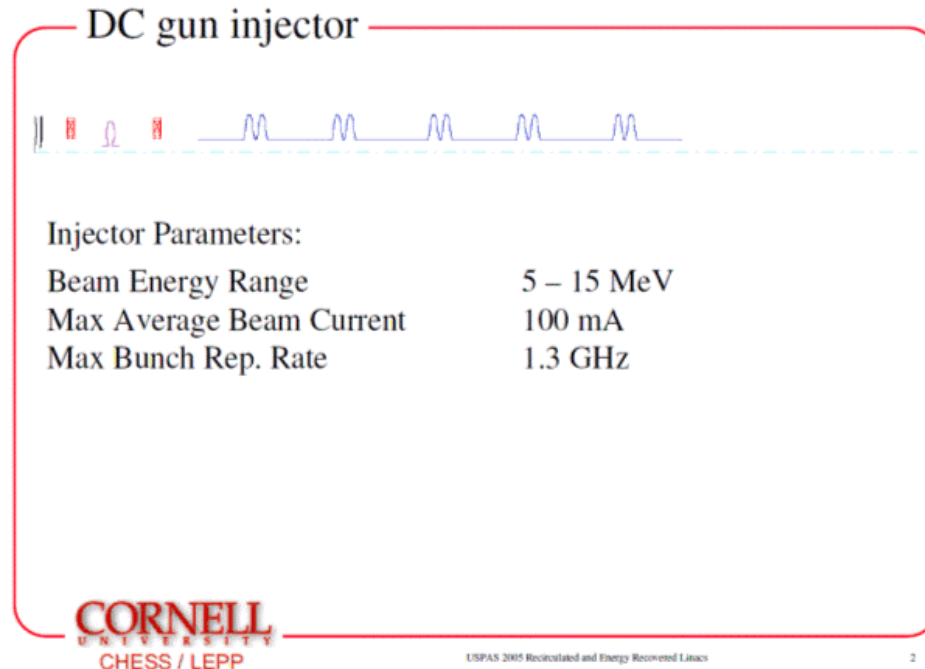
計算結果

- 10 mA : $\epsilon_x = 0.158$ mm·mrad
- 100 mA : $\epsilon_x = 1.27$ mm·mrad



入射器シミュレーション

2. Cornell入射器の再現計算 (Astra)



- 構成
- DC電子銃
- ソレノイド、バンチャー、ソレノイド
- 2-cell 空洞 × 5 (1.3 GHz)
- 1バンチの電荷: 107.7 pC
(1.3 GHz で 140 mA)
- 4極電磁石なし
- 出口までの距離: 8.56 m
- バンチ電荷: 80 pC/bunch

- 電子銃電圧 500kV の時 $\epsilon_x = 1.11$ mm·mrad (Cornell: 0.82) が得られた
- 電圧 750 kVの時、 $\epsilon_x = 0.29$ mm·mrad (Cornell: 0.14)
- 初段加速セルの加速勾配のエミッタンスへの影響について調査

入射器シミュレーション

3. 今後の課題

- JAEA型入射器のさらなる低エミッタンス化
 - 多パラメータ最適化アルゴリズム:
 - 機器の位置を可変、レーザープロファイル可変
- 超伝導空洞の大きさ、モニター、バルブ等を入れて現実的に
- 複数コードでの相互チェック
- ERL検討会(2006/4/7):羽島さん発表
 - カソードモデル改良
 - マージャー部の空間電荷効果、CSR
 - ジッター等の許容値(最適パラメータ空間の広さ)
 - 入射器におけるバンチ圧縮の可能性
 - 常伝導オプションを排除してよいか?
 - 等々

周回部ラティス設計(原田、小林)

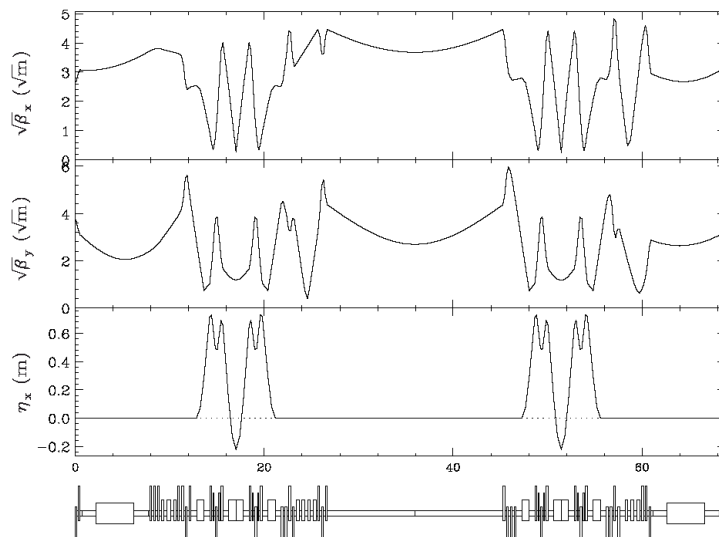
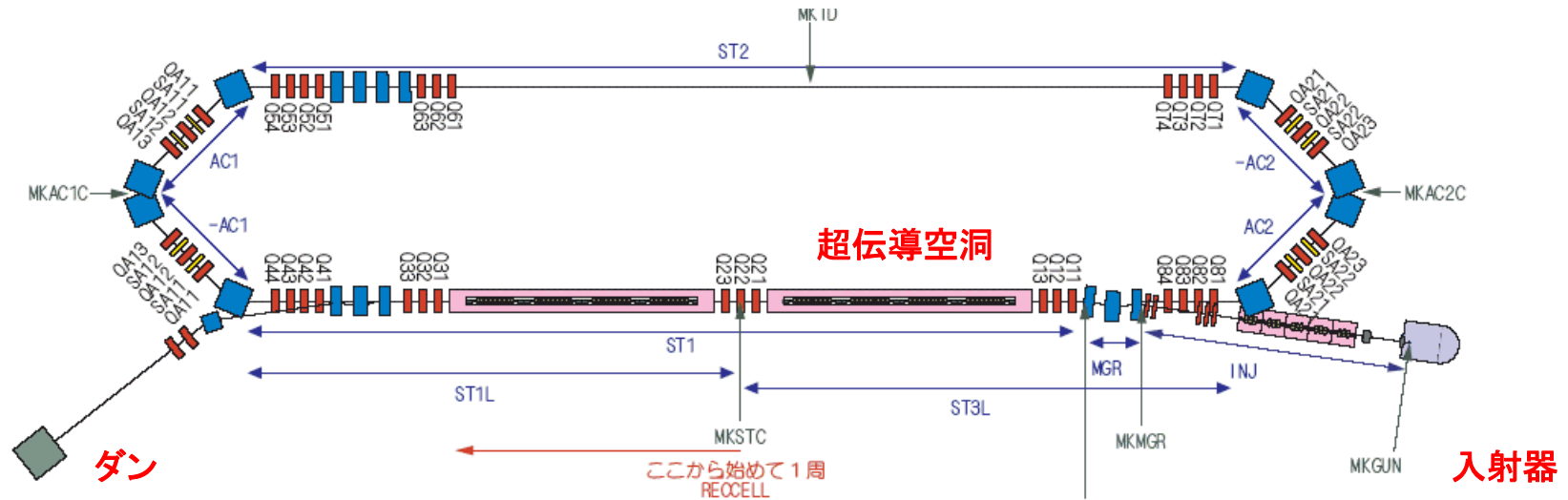
1. 周回部設計の主な課題

- 実用機と同様のラティスが望ましい → TBA
- エネルギー回収のため周長の調整が可能
 - シケインまたは可動の磁石架台
- CSR等によるエミッタンス増大を最小にする
- バンチ圧縮のため R_{56} を可変できる
- バンチ長最小化のため T_{566} 等を補正可能 → 6極磁石
- 最終的にはアンジュレータを設置可能
 - 挿入光源に最適な光学関数
- (オプション) ビーム不安定性(BBU)のスタディのためx-y結合の制御
- ビームハロー、テールの処理(コリメータ等)
 - 放射線対策。ビーム品質への影響あり。

周回部ラティス設計

2. 検討中のラティス (Triple Bend Achromat)

偏向角: 45°-90°-45°



ビーム光学関数: $\sqrt{\beta_x}, \sqrt{\beta_y}, \eta_x$

(条件)

- ・周期解(空洞中央を始点)
- ・エネルギー一定(200 MeV)
- 初期条件(入射ビーム)、
加速は今後の課題

周回部ラティス設計

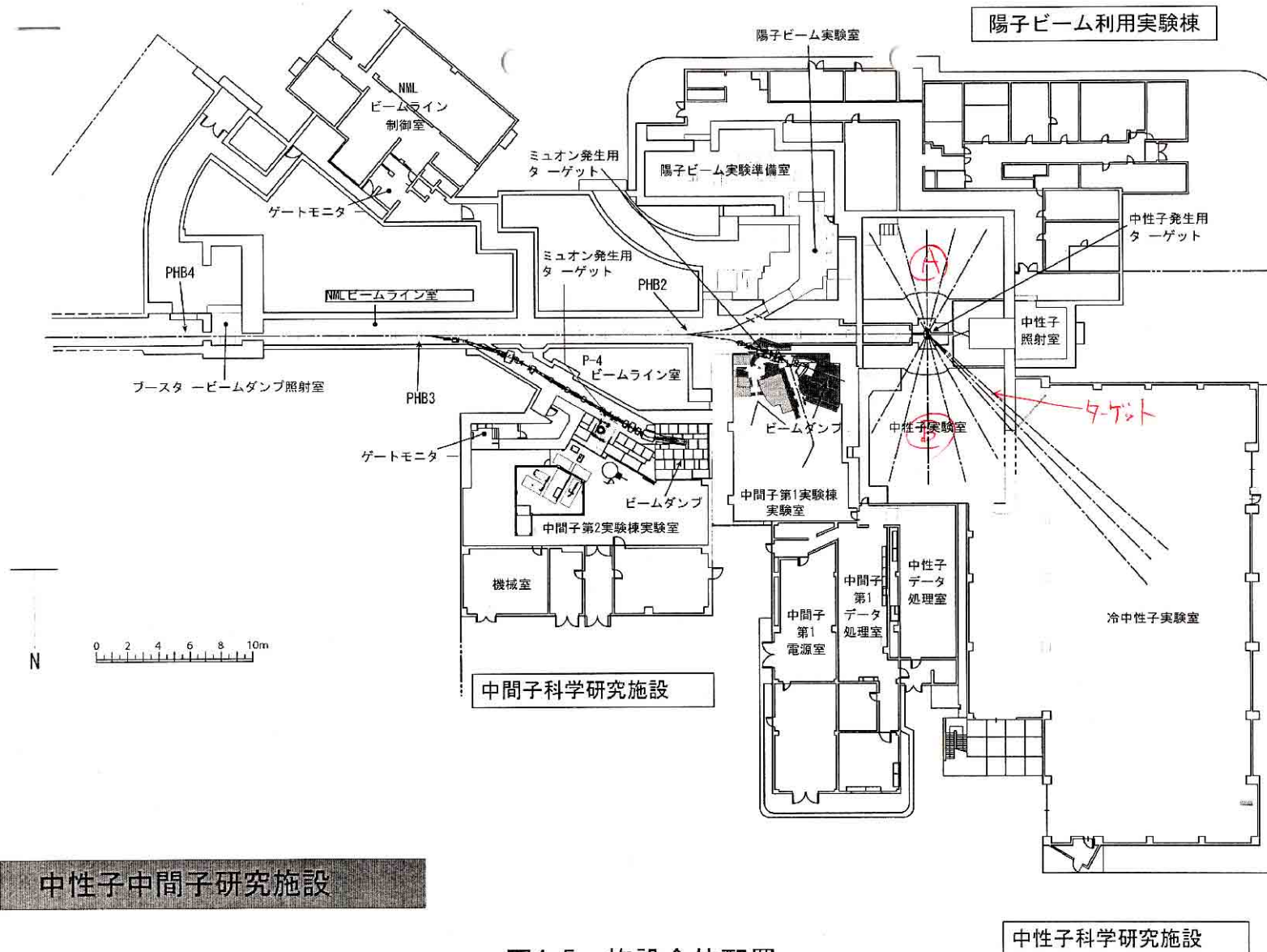
3. 今後(当面の)課題

- ビームモニター、真空、超伝導空洞とのすり合わせ
- CSRによるエミッタンス増大を考慮してオプティクス最適化
- バンチ圧縮方式
- 放射線対策(建物の課題)

建物、配置、遮蔽の検討(長橋)



中性子・ミュオン実験室配置(現状)



中性子中間子研究施設

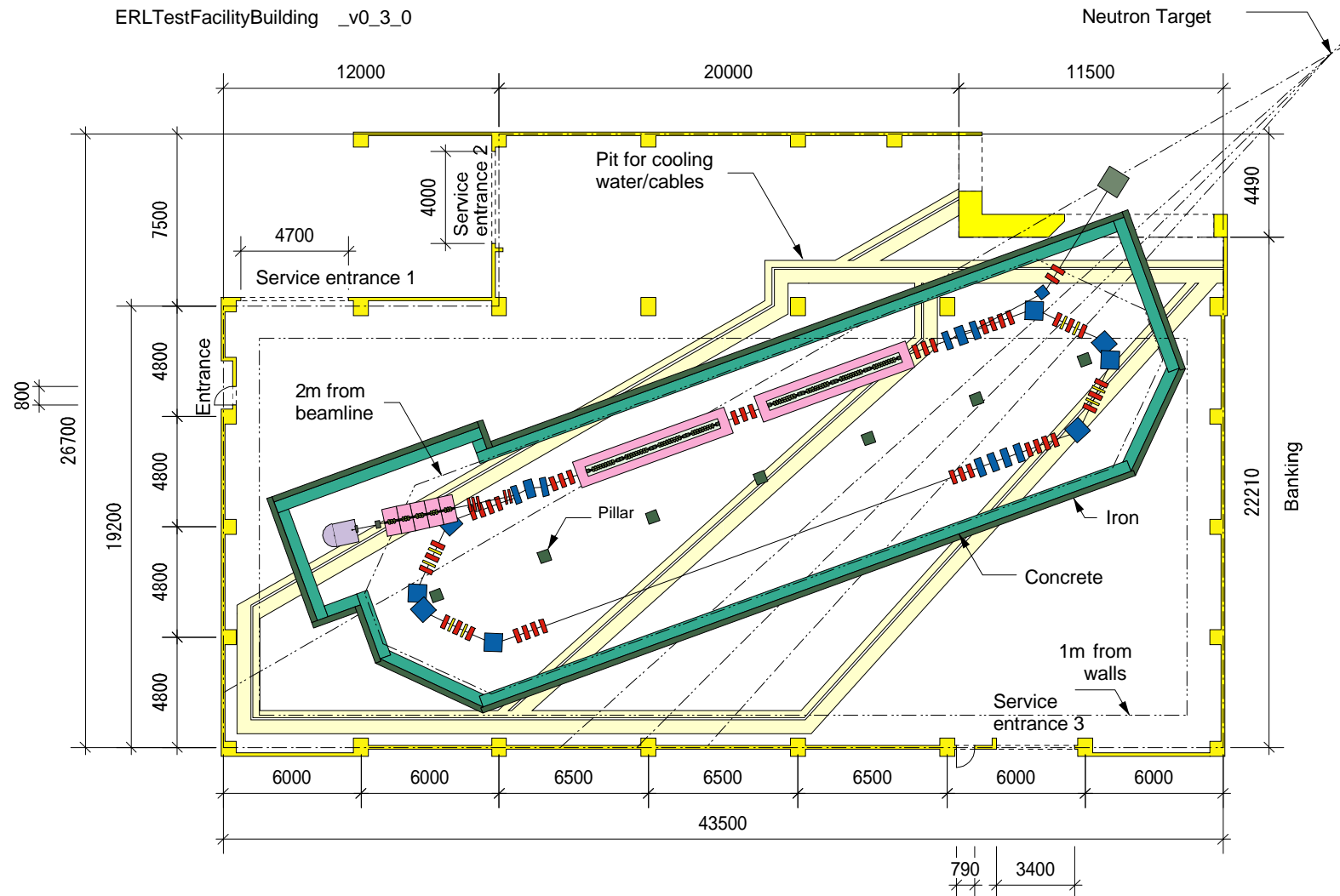
中性子科学研究施設

図4-5 施設全体配置

建物、配置、遮蔽の検討

最大ビーム電流: 100 mA
ビームエネルギー: 60 – (160) MeV

規格化エミッタンス: 1 – 0.1 mmmrad
入射エネルギー: 5 MeV (15 MeV)



建物、配置、遮蔽－現時点での問題点

建物、遮蔽に関する課題

- 今の図面の遮蔽(コンクリート 50cm+鉄 25cm)を仮定すると、**ビーム損失率 10^{-7}** 程度が必要だと推定('06/10/10 ERL検討会)
- 床の耐荷重 6.6 ton/m²(?)。耐荷重が足りない可能性。
 - 荷重分散? 補強工事? → 調査が必要。
- 冷中性子棟の横は道路(一般区域)のため、放射線レベルを0.2 μ Sv/h以下にする必要。(管理区域は20 μ Sv/hが目安)。
- 大電流 100mA → 加速器を地上設置で良いか?
 - 周辺監視区域の設定が難しい場所で良いか?
- 妥当な建設費、できる限り早急な建設とのバランスを考慮

配置に関する課題

- 磁石電源、高周波源、極低温冷凍機、等の設置場所の確保
 - 周辺建物の有効利用

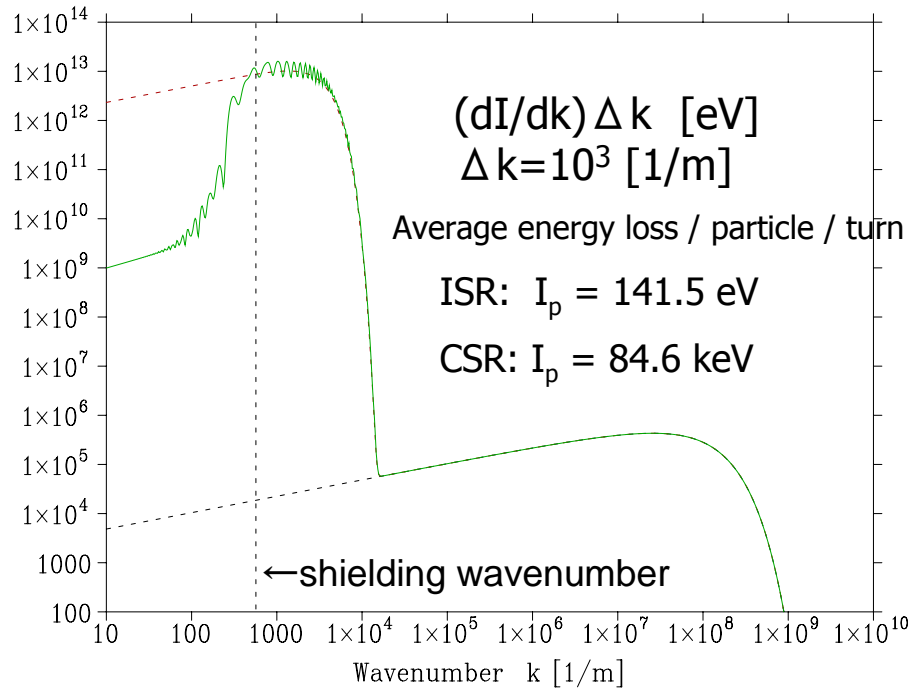
現時点での実証機パラメータ(案)

入射エネルギー	5 MeV (5-15 MeV可変)
入射器ビームパワー	500 kW (1 MW)
周回エネルギー	60 MeV ? (160 MeV 程度?)
主リニアックの クライオモジュール	9cells × 4 が1台 (同2台)
規格化エミッタンス	1 mm·mrad (0.1 mm·mrad)
ビーム電流	10 mA? (100 mA)
バンチ長	通常モード : $\sigma_z = 1-2$ ps 短バンチモード: $\sigma_z \sim 100$ fs ?
アンジュレータ	当初なし (エネルギー増強後に設置か)

当初目標。()内は最終目標。

周回部におけるCSR効果の検討(吾郷)

放射光のスペクトル



E=200 MeV

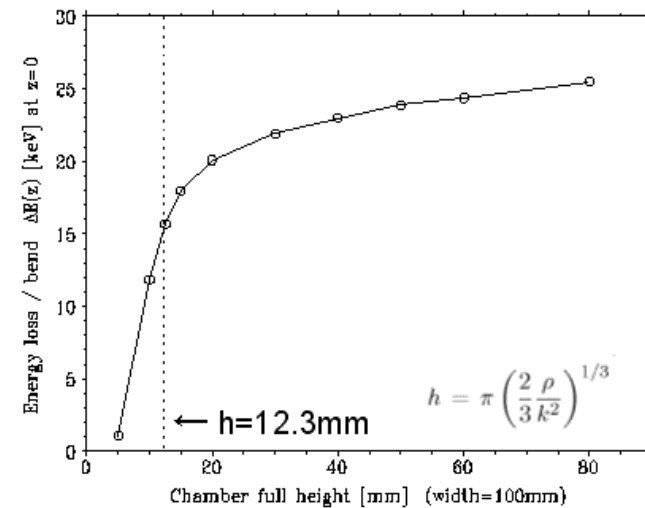
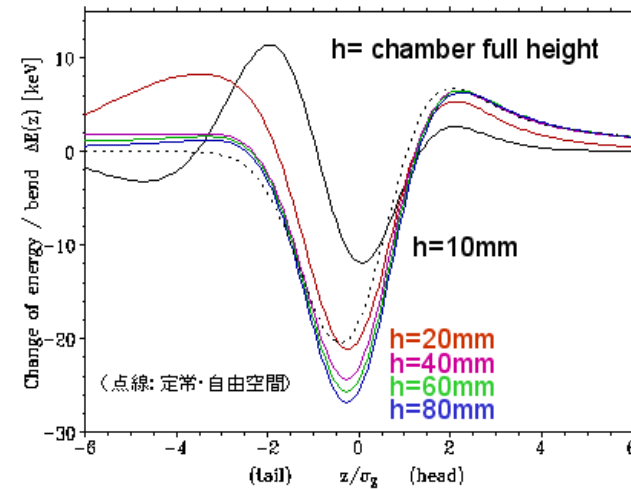
$N_e = 77$ pC ($N = 4.8 \times 10^8$)

$\sigma_z = 1$ ps (Gaussian distribution)

Bend: R=1 m, 60deg \times 6

Vac.chamber: 100mm \times 40mm (Cu)

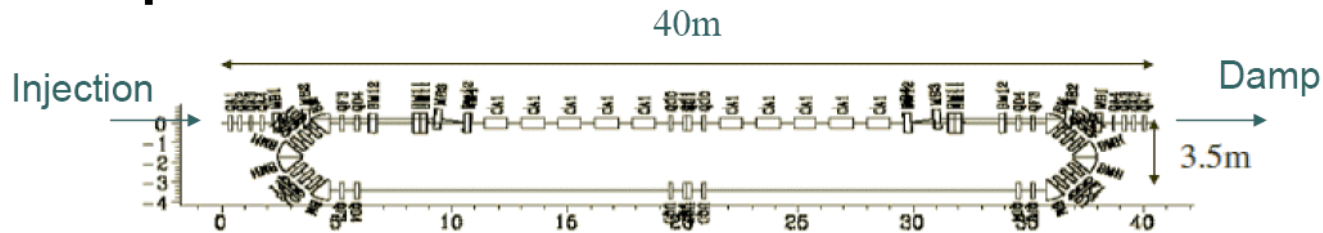
シールド効果



遮蔽の目安: 高さ12mm ($\sigma_z = 1$ ps)

アーク部でのCSRによるエミッタンス増大の最小化(島田)

(以前の設計) 200MeV Test ERL



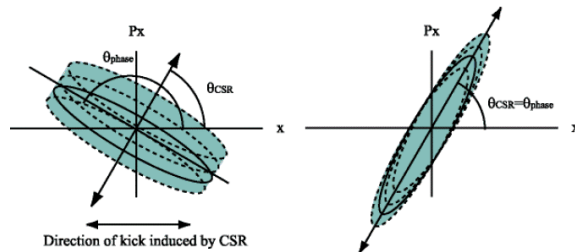
アーク部でのCSRによるエミッタンス増大の最小化方法

計算例(バンチ圧縮なし)

● ● ● CSRによるtransverse phase spaceの変化

- α の調整によるエミッタンス増加の抑制

R. Hajima, Nuclear instruments and Methods in Physics Research A 528 (2004) 335-339

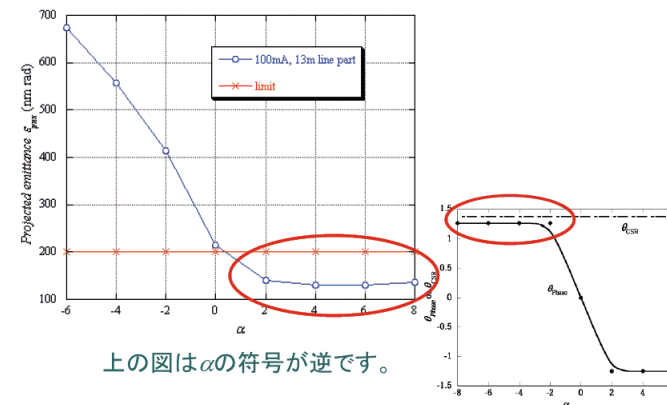


- CSRによるキックの方向 θ_{CSR} とARC出口の位相空間の傾き θ_{Phase} が等しければ、 ϵ_{pnx} の増加を最小に抑えることができる。

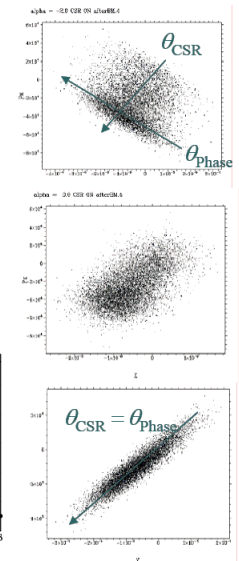
● ● ● θ_{Phase} の最適化と ϵ_{pnx} の増加

(bunch圧縮なしの例)

- θ_{Phase} が θ_{CSR} に近いときに ϵ_{pnx} を200nm rad以下に抑えられる。
(横軸 ARC出口の α , 縦軸 ϵ_{pnx} [nm rad])



上の図は α の符号が逆です。



Resistive-wall multi-bunch BBU (中村)

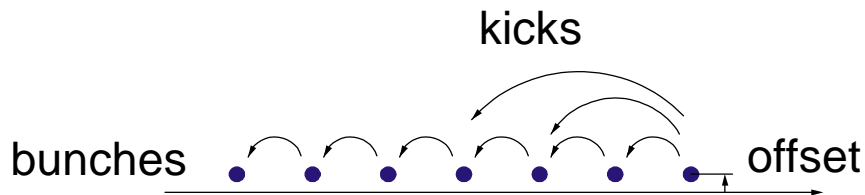
- 真空チャンバーの抵抗性インピーダンスによって横方向不安定性が引き起こされる可能性
- Wake の大きさは真空チャンバーの径に大きく依存: $W_{\perp} \propto \frac{1}{b^3}$
 - チャンバー径の決定の際に考慮すべき点の一つ(実用機)
- 解析的なモデルによる growth time の見積もり

Transverse kick of resistive-wall wake

- Kick angle due to resistive-wall wake per bunch

$$\Delta\theta_y = -\frac{e^2 N}{E} W_{\perp} \cdot y = \frac{e^2 N}{E} \cdot \frac{cL}{\pi b^3 z^{1/2}} \sqrt{\frac{Z_0}{\pi \sigma_c}} \cdot y$$

N : Number of electrons per bunch E : Beam energy



Equation of motion

Equation of motion for a particle in the M -th bunch

$$y_M''(s) + k_y^2 y_M(s) = \sum_{N=0}^{M-1} S(M-N) y_N(s)$$

$$S(M) = \frac{a}{\sqrt{M}}, \quad a \equiv \frac{e^2 N}{E} \cdot \frac{c}{\pi b^3 (c\tau_B)^{1/2}} \sqrt{\frac{Z_0}{\pi \sigma_c}} = \frac{4I_B}{I_A} \frac{\delta_{skin}}{b^3}$$

$$I_B = \frac{eN}{\tau_B}, \quad I_A = \frac{4\pi\epsilon_0 mc^3 \gamma}{e}, \quad \delta_{skin} = \sqrt{\frac{\tau_B}{\pi\mu_0 \sigma_c}}$$

τ_B : bunch separation in unit of seconds k_y : external focusing

s : position of resistive-wall pipe, $s=0$ at the entrance

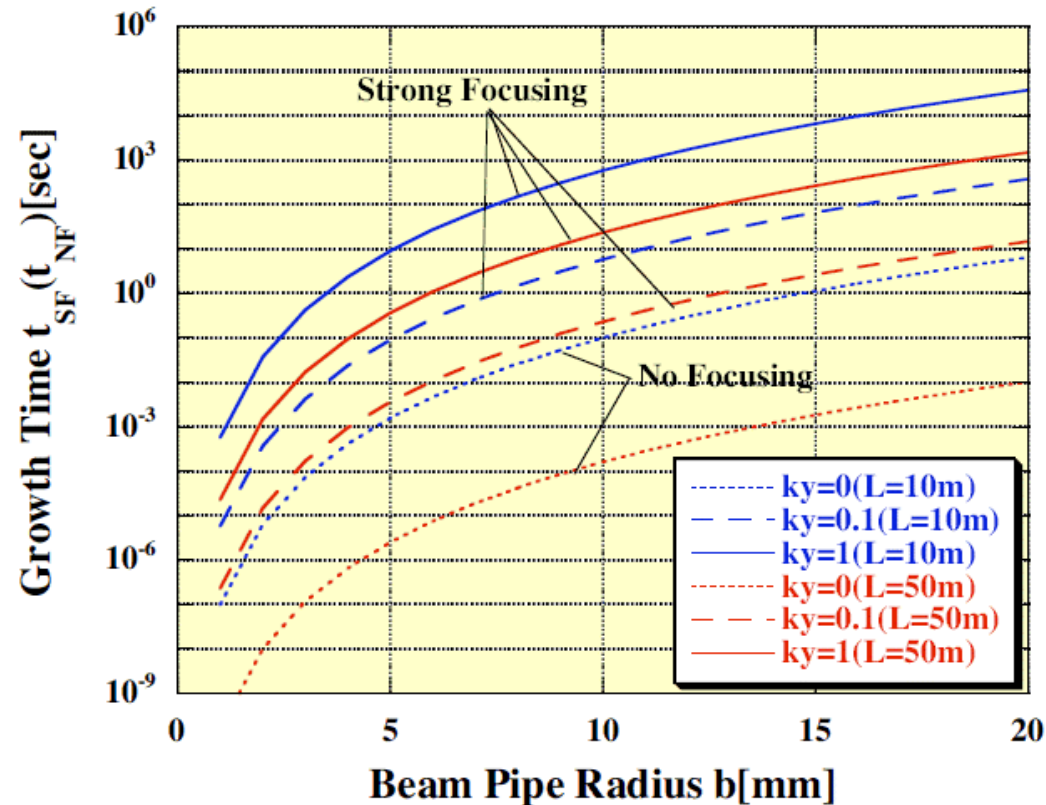
Asymptotic solution for $M \rightarrow \infty$ ($M \sim t/\tau_B$)

(J. M. Wang and J. Wu, PRST-AB 7, 034402(2004))

Resistive-wall multi-bunch BBU

Results of SF case (1)

Growth Time of Strong Focusing(SF) Case

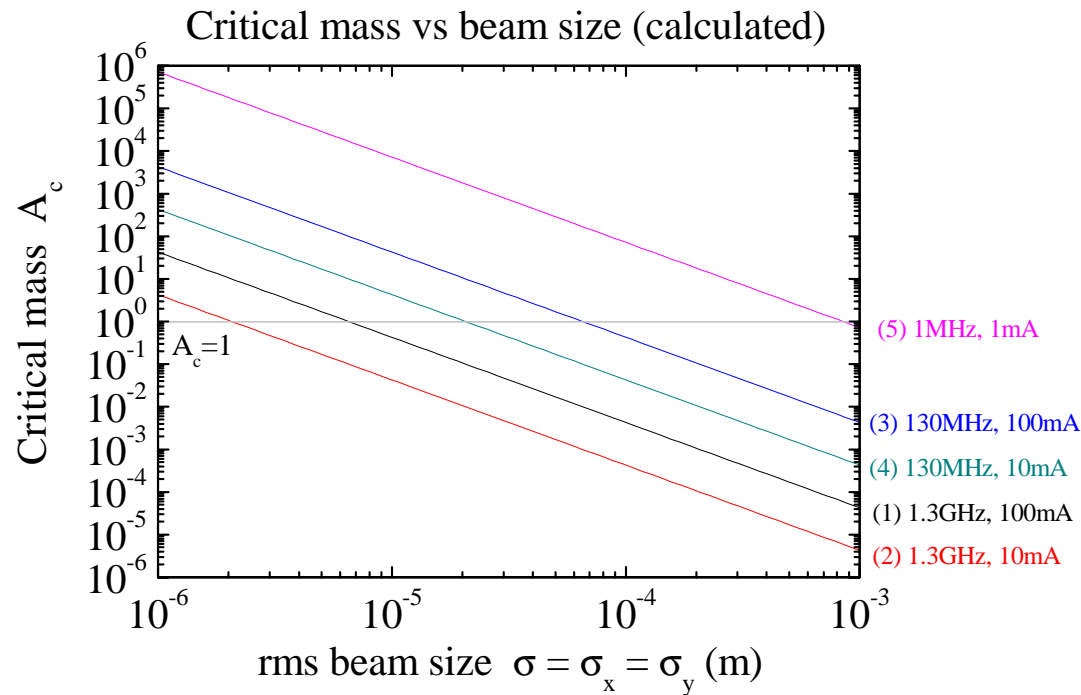


$$t_{SF} \propto k_y^2 b^6 L^{-2} \quad (t_{NF} \propto b^6 L^{-4})$$

- 何らかの減衰機構(フィードバック等)が必要となる可能性が大きい。

イオン捕獲(坂中)

Bunched beam における
critical mass の見積もり



イオンの収束力による tune shift

$$(\Delta v_x)_{\text{ion}} = \frac{r_e}{2\pi\gamma\beta^2 e} \int_0^L \frac{\beta_x \lambda_i}{\sigma_x^i (\sigma_x^i + \sigma_y^i)} ds$$

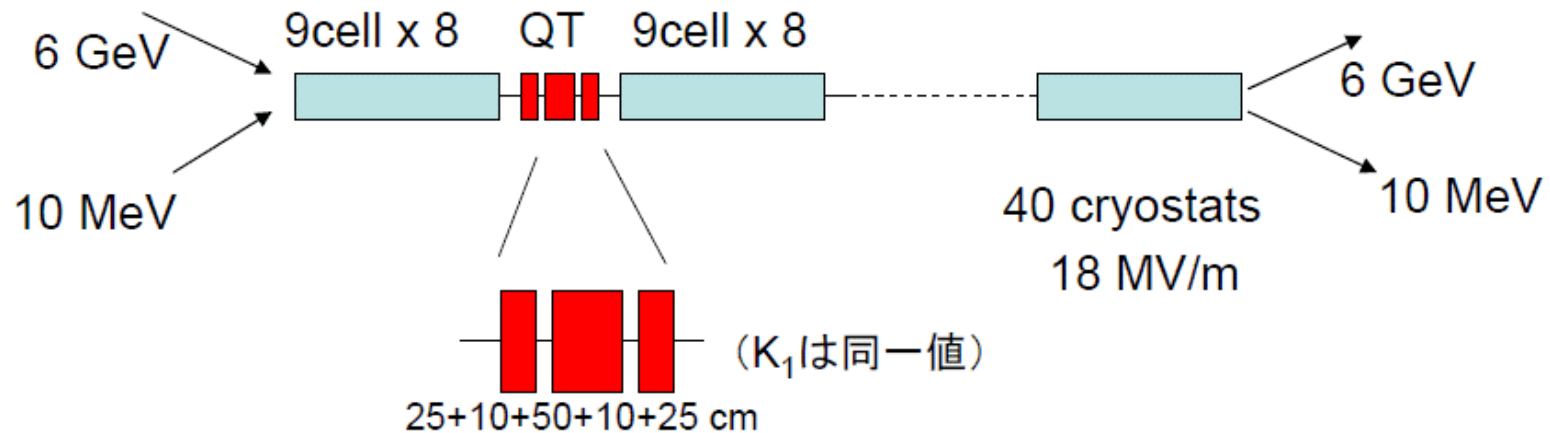
$$\square \frac{r_e I_0}{4\pi\beta^2 c e \epsilon_n} \langle \eta \rangle L$$

仮に $\Delta v < 0.1$ を要求するならば、
実証機: $\langle \eta \rangle \sim 2 \times 10^{-3}$ 以下、
実用機: $\langle \eta \rangle \sim 2 \times 10^{-4}$ 以下
が必要とされる。

- バンチ繰り返しの高い運転モードでは、critical massによるイオン捕獲の抑制効果はあまり期待できない。
- ベー外ロン振動の位相エラーを考えただけでも、中性化率 η が1近くになるのは許容できそうにない。

HOM-BBUの解析(羽島、永井)

- 超伝導空洞の高次モード(HOM)による Beam Breakup (BBU) の解析
- 以前の検討(KEK-菖蒲田氏、JAEA)の違いを理解する(TESLA空洞)
- SCグループが検討中のERL向け空洞を用いた場合のしきい電流

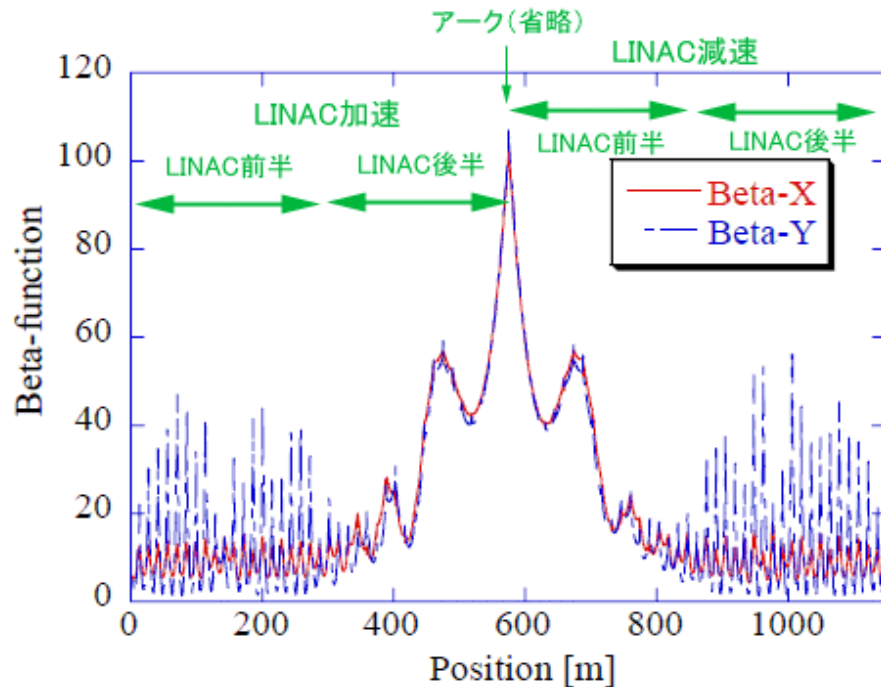


BBU-R code を用いたシミュレーションモデル

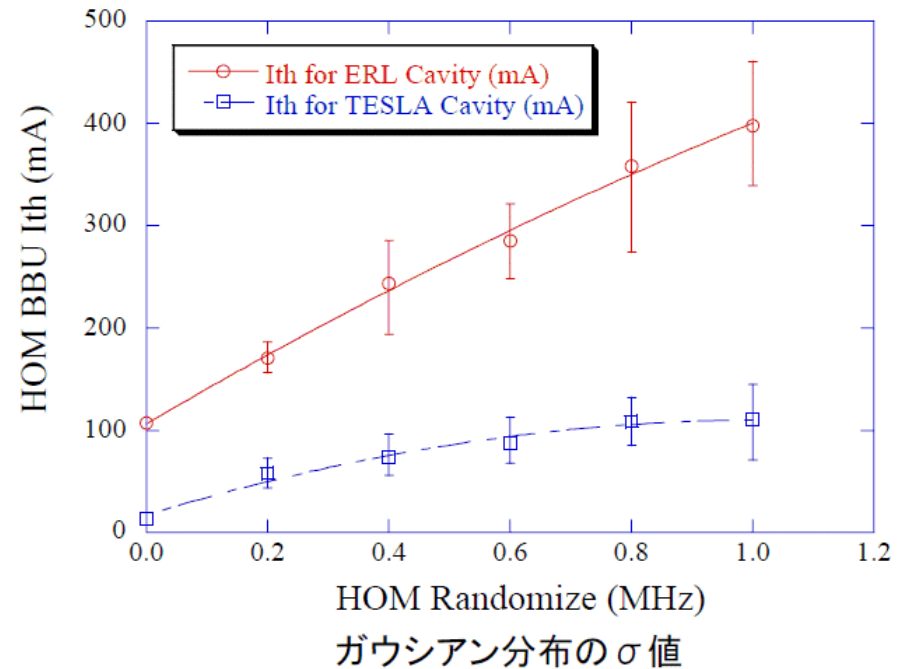
- ビームエネルギー: 入射 10MeV、周回 6GeV (実用機を仮定)
- Triplet によるリニアック部の収束系。しきい電流が高くなるようにリニアックのオプティクスとループでの位相進みを最適化。

HOM-BBUの解析

リニアック内での β 関数(最適化後)



しきい電流



BBU-R code、オプティクス最適化あり

- TESLA空洞: $\sigma_{HOM} = 1\text{MHz}$ で $I_{th} = 110\text{mA}$ (アイリスモードを入れた)
 $I_{th} = 170\text{mA}$ (アイリスモードなし)
- ERL空洞 : $\sigma_{HOM} = 0.4\text{MHz}$ で $I_{th} = 200\text{mA}$

まとめ

- 入射器: 過去の設計例の再現計算を行った。今後、最適化アルゴリズムによる設計改良と各コンポーネントとのすり合わせを行う。
- 周回部: 大まかな設計ができたので、今後最適化、各機器とのすり合わせ等を行う。
- 建物、遮蔽に関して課題がある。
- CSR, ビーム不安定性に関しても、検討が進んでいる。