

東北大核理研将来加速器構想 - リナック -

浜 広幸¹、栗原 亮、柴崎 義信、神藤 勝啓、高橋 重伸、田中 拓海、七尾 昌士、日出 富士雄、
宮本 篤、武藤 正勝

東北大学大学院理学研究科附属原子核理学研究施設

〒982-0826 宮城県仙台市太白区三神峯1-2-1

概要

東北大核理研を母体として、放射光リング建設を中心とする電子線科学センターの将来計画が進められている。現有の1.2 GeV電子シンクロトロンを入射器として、新たな加速器群の構成が考えられている。その中で非常に長年に渡って使用されてきた電子リナックの老朽化と、極度に多目的化された複雑な運転形態を解消することを目標として検討している新リナック構想を報告する。

1. はじめに

東北大核理研電子リナックは37年にも及ぶ歴史をもち、今尚現役マシンとして多種の共同利用実験にビーム供給を行っている。しかしながら老朽化は激しく進行しており、現状維持のみの将来は、故障とそのリカバーに費やす時間は膨大になり、またビーム品質はモダンなそれに比べ大きく劣り最先端な研究に遅れをとることが容易に予想される。

図1に示したように、放射光リングの設置構想においては現有の電子シンクロトロン（STBリング）を入射器とし、リナックはその前段入射器の役割を担う。しかしながら現在の研究活動の継続も重要であり、入射器の安定した機能と多目的利用を同時に満たす方策が新しいリナック構成に要求される。

現在電子リナックは大きく分けて3つの運転モードによって利用実験にビームを供給している。a)

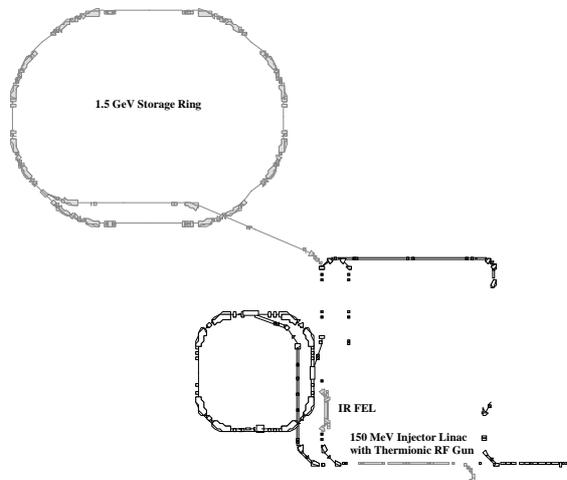


図1：核理研加速器群将来構想

高繰り返し（300Hz）・低エネルギー（<50MeV）での高平均電流（150μA）によるRI製造、b) 低繰り返し・高エネルギー（200MeV）のブースターモードのSTBリングへのビーム入射、c) 高繰り返し（<300Hz）・高エネルギー（>150MeV）のパルスストレッチャーモードのSTBリングへのビーム入射。

これらをすべて満たすようにリナックを更新することは甚だ不合理かつ高価である。異なるビーム性質による多目的利用の問題点として、マシンチューニングの非利便性とそれによる運転操作の煩雑が挙げられる。さらに核理研リナックのように非常に古い加速器では、高度にビーム品質に依存する先端科学への応用は殆ど不可能であり、いきおい単にビーム強度を要求されるのみで、発展的な加速器の応用科学が疎外される。

以上のような現状考察の末、今後のリナック利用については機能分割が先決と結論付けられ、現在のリナックは低エネルギーのRI製造を中心とする高平均電流運転専用として、高エネルギー部のみを新たに置き換えることとし、シンプルな機器構成を狙い電子源に熱陰極RF電子銃を用いる計画を立案した。

2. ビーム性能目標

現有リナックを分割して低エネルギー部のみを残して、従来のRI製造の利用実験にビーム供給する。高エネルギー部の加速管列は更新して、STBリングを用いる実験のために入射器とすることが骨子となる。加速器室の空間スペースの制約や経費も考慮し、目標とするビーム性能に到達するためのリナック構成を検討した。

これまでのビーム利用実績を踏まえ、STBリングへの入射に満足すべきビーム性能を表1に示す。

表1：目標とするビーム性能

	ブースター入射	ストレッチャー入射	IR-FEL
エネルギー	150 MeV	150 MeV	< 50 MeV
ビーム電流	100 mA	> 100 mA	300 mA
マクロパルス巾	400 ns	300 ns	> 3 μs
エネルギー巾	0.5 %	1 %	0.5 %
繰り返し	Max 10 Hz	100 Hz	10 Hz

ブースター入射においては、現在ピーク電流70mA程度で約2ターン分（320ns）のマルチバンチ

¹ E-mail: hama@lns.tohoku.ac.jp

ビーム入射を行い、1.2GeVまで50mA程度のビームが加速されている。RF捕獲の効率は計算上約70%なのでほぼ半分のビームが加速過程で失われている。このビーム損失の原因は加速中の水平と垂直チューンの交差がシンクロトロン振動のサイドバンドで発生していることと、入射ビームエミッタンスが大きい(規格化200 mmmrad)ことによる損失である。ある程度の低エミッタンスでピーク電流100mA程度のビームが入射でき、リングのクロマティシティ等のパラメータの最適化を計れば、100mA近くのビームを加速できると予想している。

STBリングをパルスストレッチャーとして運転する場合のビーム入射はブースター運転に比べ、はるかに精密な制御を必要とする。入射ビームのエミッタンスは取り出しビームのそれに直接関わるので、できる限り小さなエミッタンスのリナックビームを完全に光学的マッチングさせた入射が望ましい。また放射光によるエネルギー損失と有限なクロマティシティによって1/3共鳴を励起するので、入射ビームのエネルギー巾が連続ビーム取り出しの時間を決定する。100%のデューティと高い平均電流(1 μ A以上)を要求すると、100Hz以上の高繰り返しビームを必要とする。

表1におけるIR-FELは今後のビーム利用の分野拡大および放射光施設への先駆的な光源として挙げたもので、主に生命科学・医療技術への応用を考えている。また表1の他にもコヒーレント放射やミリ波のPre-bunched FELの基礎研究などのパルスビームそのものの利用がある。

以上のような多くのビーム利用を一つのリナックへ集約することは甚だ困難であり、また予算縮小は避けられない課題である。パルスストレッチャーの利用実験ではエネルギー領域の拡大も求められるが(現在は最高200 MeV)、後述のような(具体的にはクライストロン数を2本とした)理由から150 MeVをリナックの最大エネルギーとした。

3. リナックの構成

3.1 加速器本体

STBリングの1.2GeVビームの利用実験を中心に据えた研究活動と将来計画の放射光リングへのビーム入射のタスクを重点に扱う方針があることから、加速器の構成は図2に示すものを考えている。STBリングのブースターモードでの磁場安定性からビームエネルギーは150MeV以上が望ましく、電流は100mAを最低限として考えると、3m加速管4本または3m管2本と2m管3本もしくは4本を2台の50MWクライストロンでドライブする構成が最も単純である。更に単純な機器構成を必須条件とすると、電子源は通常のDC電子銃を用いるより、熱陰極RF電子銃が最も相応しい。特に繰り返しが遅く短いマクロパルスで行うブースター入射だけを考えると、この加速器構成で不足はない。

図2中のRF電子銃後段のチョッパーはマクロパル

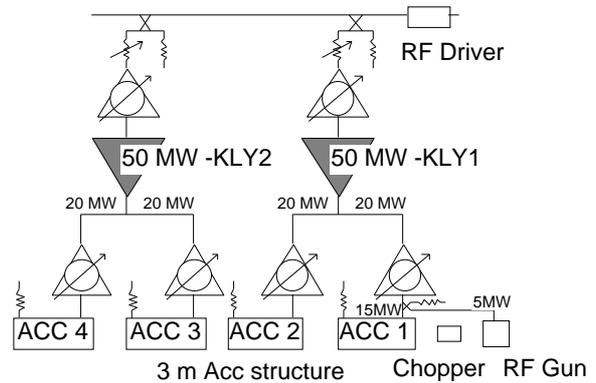


図2：リナック構成図

ス長を制御するためのもので、高周波空洞チョッパーを考えている。

3.2 熱陰極RF電子銃

熱陰極RF電子銃は多くの場合FELなどの高ピーク電流と低エミッタンスを必要とするビーム利用に用いられてきた。フォトカソードによる更に高輝度ビーム生成もSASEなどの先端加速器科学の分野で急速に進展している。しかしながら熱陰極を用いたRF電子銃の場合、空間荷電効果によるエミッタンス増大の問題よりも、減速位相に入り込む逆流電子がカソード面を叩き熱暴走を引き起こす(back-bombardment)の問題が深刻であるため、医療などの汎用的なリナックには普及に至っていない。このbackbombardmentの問題は長マクロパルスについて特に重大である。マクロパルスの時間内でのカソードの温度上昇により、パルス後半に一気に電流増加し、RFのブレイクダウンにも繋がる事が報告されている[1]。

カソードに衝突する逆流電子を軽減するために幾つかの対策や試みが施されている。代表的で簡便な方法としては、カソード近傍に双極磁場を与え逆流電子をそらす方法がある[2]。経験的ながら効果は良好なケースがある。また、LaB₆のような高電流密度のカソードを用いて、カソードの面積を小さくして、双極磁場によって逆流電子をそらしやすくすることが重要な要素として挙げられるであろう[3]。

核理研においてはブースター入射について必要とするマクロパルスは僅かに300 ns程度であり、極端に高ピーク電流も必要としない。従って現在稼動している熱陰極RF電子銃の性能で十分に機能すると思われる。しかしながら、高繰り返しを必要とするパルスストレッチャーの入射については、back-bombardmentの影響が明確でない。マクロパルス内でのカソード温度の上昇は明らかに軽減すべき影響であるが、2 μ s程度以下の短いマクロパルスの場合はカソード温度の変化は小さく、影響が殆ど見られないとされる。繰り返しが高くなった場合でも、その状況に変わりがないかは不明である。高繰り返し

し運転での熱陰極RF電子銃の特性や最適化は今後の重要な課題の一つである。

4 . FDTDによる3次元シミュレーション

双極磁場によって効果的にbackbombardementを抑制し、また電子ビームの品質を劣化させないような最適化を探るには、従来からよく行われている軸対象2.5次元モデルのシミュレーションより、時間発展を取り込んだ3次元モデルによるビームダイナミクスの調査が有効である。そこでエミッタンス等のビーム性質も詳しく知るために、FDTD (Finite Difference Time Domain) 法を用いて、空間電荷も含めて境界条件を満たすMaxwell方程式の時間発展を数値的に解くシミュレータを開発して、熱陰極RF電子銃の特性の評価を開始した。熱陰極RF電子銃の一般的性質の把握のために、電子銃のキャビティ構造は3セルからなるOn-Axis Coupled Structure (OCS) タイプを例に、シミュレーション計算を行った。加速に用いる $\pi/2$ モードの共振周波数を2.856 GHzの近傍になるように同径サイズを設定し、その他の形状については現在最適化を行っているが、計算結果の例を示す。

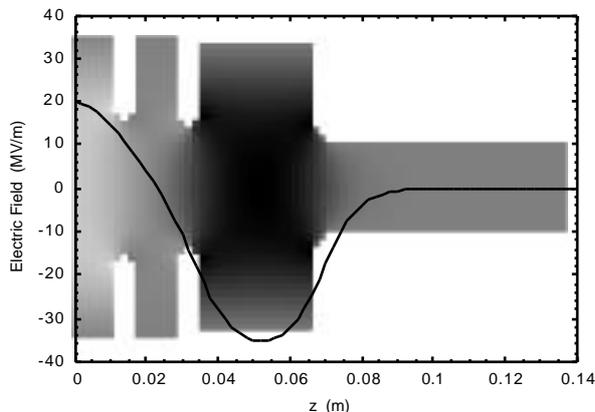


図3 : FDTDで計算した $\pi/2$ モードの軸方向電場分布 (電場強度を濃淡で示している)

第1セル (引き出し) での電場を大きく与えると逆流電子の平均パワーが上がるということが分かっているので、図3に示すような第3 (加速) セルに比べ比較的低いカソード表面電場になるセルの結合でビームトラッキングを行った。

ここでは直径6mmのdispensorkアソードを想定し、電流密度を30A/cm²とした。電子銃出口での電子の運動エネルギーのピーク近傍での時間との関係を図4aに示した。エネルギーと時間の相関はほぼ線形であり、あるエネルギー巾のコリメーションを設ければ、それに応じたバンチ長が得られることが分かる。エネルギースリットを装着した磁石によるバンチ圧縮を行うべきか否かは検討中である。運動工

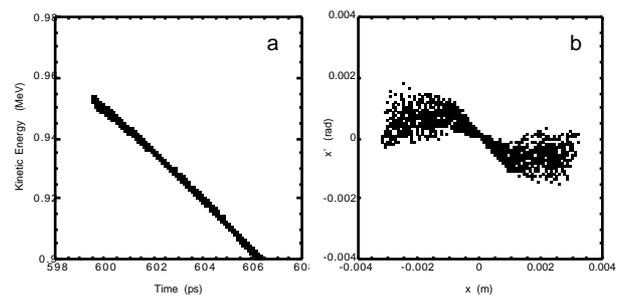


図4 : a 電子銃出口でのエネルギーと時間の相関、b 運動エネルギーがピークから1%の範囲で選択した電子の位相空間

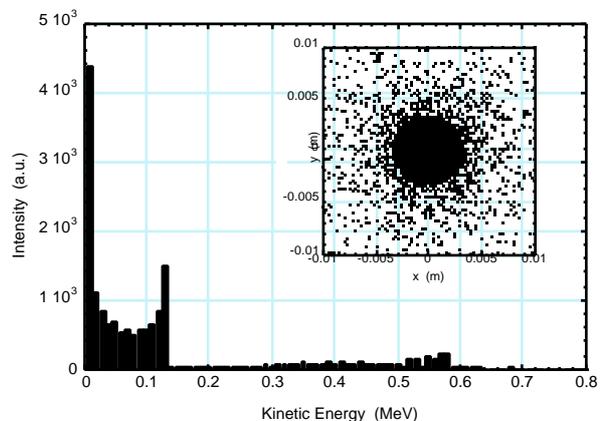


図5 : 逆流電子のエネルギー分布と空間分布 (insert)

ネルギー巾をピークから1%で選択した時の規格化ビームエミッタンスは約1.7 mmmradで (図4b)、マクロパルスのピーク電流は290mAが得られた。

図5に逆流電子のエネルギー分布とその空間分布を示した。カソードに衝突する逆流電子の大部分は第1セル中でRFが位相反転して戻り低エネルギー電子である。この計算例では1.5MeV以下の逆流電子数は全引き出し電子の40%に達し、カソードに与えるパワーは83kWである。

5 . 今後

熱陰極RF電子銃の最適化を更にすすめ、実用に足る性能を実証してゆくと同時に、高繰り替えし運転に対する諸問題解決のR&Dが必要である。また加速器全体の構成が現在のユーザー実験に適合するだけでなく、将来の発展性を損なわないような見通しを含めて煮詰めるべきであろう。

参考文献

- [1] K. Masuda et al., Nucl. Instr. and Meth. A 483 (2002) 315.
- [2] C.B. MacKee and J.M.J Maday, Nucl. Instr. and Meth. A 296 (1990) 716.
- [3] M. Kawai, private communication