

[08-A02]

SYSTEM DESIGN OF A SUPERCONDUCTING LINAC FOR THE JAERI-KEK JOINT PROJECT

Kazuo Hasegawa, Motoharu Mizumoto, Nobuo Ouchi and Shuichi Noguchi*

Japan Atomic Energy Research Institute
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken, 319-1195, Japan
* High Energy Accelerator Research Organization (KEK)
1-1, Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken, 305-0801, Japan

Abstract

Design study of a superconducting linac (SCL) for the JAERI/KEK joint project has been carried out. The energy range of the SCL is 397 to 1000 MeV. The cavity frequency is either 648 or 972 MHz. The linac is comprised of 6 groups and each group consists of identical 7-cell cavities. Two cavities are laid in one doublet focusing lattice. The lengths of the SCL sections are 269 m and 281 m at 648 MHz and 972 MHz, respectively.

原研-KEK統合計画用超伝導リニアックのシステム設計

1. はじめに

原研とKEKでは、中性子散乱、消滅処理や高エネルギー核物理等の研究を目的に、中性子科学研究計画とJHF計画の統合計画を進めている[1]。この計画に使用される加速器は、リニアックと3GeVシンクトロン、および50GeVのシンクロトロンから構成される。建設計画は2期に分けられ、当初の第一期のリニアックでは397~600MeVの範囲を、また、アップグレードとなる第二期では1000MeVまでを超伝導リニアックで加速することとしている。ここでは超伝導リニアックのシステム設計として、構成の検討とビームダイナミクス計算によるエミッタンスの評価を行った。

統合計画での加速粒子は負水素イオンであり、電流は最大60mAである。上流となるRFQ、DTL、SDTLの部分の周波数は324MHzと決定されているが、次段のCCL部分は、その2倍とするか3倍とするか未定である。このため、ここでは候補となる加速周波数648MHzと972MHzの2通りについて検討した。

2. 設計検討の方法

設計検討は、空洞のグループ化、電磁場解析、ラティスの設計、ビームシミュレーションの順序で行った。以下にその内容について示す。

① 空洞グループ分割の検討

ここで対象とするエネルギー領域では、陽子の速度は光速まで達せず、加速につれて増加する。常伝

導のように陽子の速度に合わせて空洞の種類を用意することは、超伝導ではコストの点から得策でない。そこで空洞を幾つかのグループに分け、そのグループ内では同じ形状の空洞を使うことを基本とした。陽子の β (光速に対する速度)と空洞の幾何学的な β (β_g と表現する)が違うために、複数の空洞セルを通過する間に位相のずれ(位相スリップ)が起こる。空洞グループの分割は、各グループでの位相スリップが同じになるような考え方で行った。

空洞あたりのセル数の選択では、セル数が多い程、加速器全長に占める加速部分が長くなり加速器長の短縮が期待される。しかし、HOMの取り出しや機械的振動特性、カプラからの供給パワーの増加などのデメリットもある。ここではそのバランスから空洞あたり7セルの構成とした。

以上の考え方で397~1000MeVまでを6分割した場合の空洞の β_g は、0.725, 0.751, 0.778, 0.806, 0.833, 0.861となる。7セルの空洞を使った場合、最大の位相スリップは ± 12 度である。

② SUPERFISHを用いた電磁場計算

グループ化によって決定した空洞の β_g について、SUPERFISHコードによりTransit Time Factor (TTF)、 E_{peak}/E_0 等の電磁場に関する計算を行う。図1に計算例を示すが、超伝導空洞ではビームダクトへの漏れ電場が大きく、ダクトが付いていないセンター部分とダクトを持つエンド部分のそれぞれについて評価している。ダクト部分の電場は減速位

相として働くために仮想セルとして考え、負の TTF で与えることとした。位相スリップを認める条件で使うことから、センター、エンド、仮想の各セルについて β/β_g の3次関数で表現した。図1のセンターセルを例にとると、 $x=\beta/\beta_g$ として $TTF=0.780(-1.0848+4.4819x-3.2243x^2+0.8272x^3)$ である。 $x=1$ のとき、エンドセルはセンターセルよりも数%低く 0.734、仮想セルは-0.493 である。

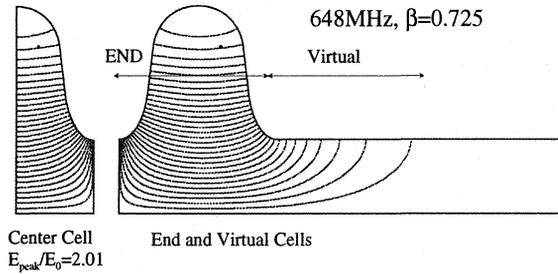


図1 SUPERFISHの計算例

③ラティスの設計

電磁場計算結果を使い、それぞれのセルと空洞の加速エネルギーを求め、Q磁石の配置、磁場勾配などのラティス設計を次に行う。

Q磁石の磁場勾配は、縦方向のエミッタンス増加を抑える観点から、次の式で表わされる Equipartitioning の関係に基づいて決定した[2]。

$$\gamma \frac{\epsilon_{nx}}{\epsilon_{nz}} \frac{z}{a} = 1$$

ここで ϵ_{nx} 、 ϵ_{nz} は横方向と縦方向の規格化エミッタンス、 z 、 a はバンチの大きさ、 γ は相対論のローレンツファクターである。

負水素イオンを加速することから、ローレンツストリッピングを抑制する必要がある。ここでは Q磁石位置でのダクト半径を 5cm とし、その限界磁場に対して 10%の余裕を取ることとした。さらに、Envelope Instability を避けるために、1収束周期のゼロカレント位相進みが 90度以下となるような

設計とした。

設計の条件を図2に示す。平均同期位相は-35度、ダブレットの収束要素内には1個のクライオモジュールとし、その中に2空洞を配置する構成とした。図3は 648MHz の設計についての Q磁石の磁場勾配である。加速エネルギーの増加に従って、ローレンツストリッピングの条件が急に厳しくなり、長い Q磁石 (図では L_q と表示) が必要となる。

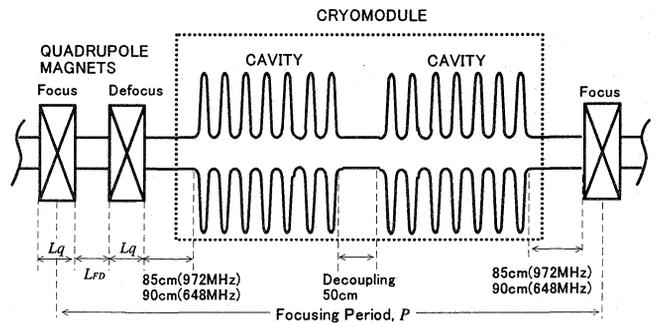


図2 設計検討の条件

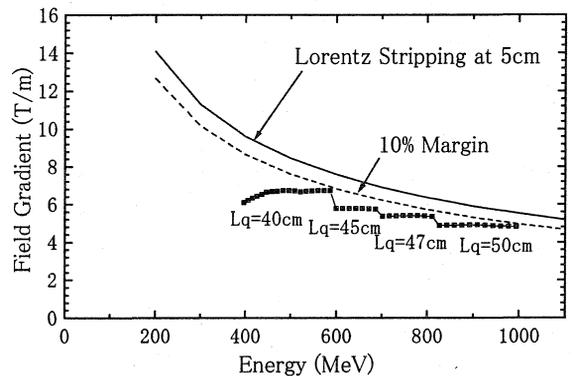


図3 Q磁石の磁場勾配 (648MHz)

3. 設計結果

設計結果として、各エネルギー領域におけるクライオモジュール数と長さを表1にまとめた。397から1000MeVの加速器の長さは、648MHzで269m、972MHzで281mである。972MHzでは空洞セル長が648MHzの2/3と短いために加速器長が長く

表1 超伝導リニアックの設計結果

| Freq (MHz) | E_{peak} (MV/m) | 397-600MeV | | 600-1000MeV | | 397-1000MeV | |
|------------|-------------------|------------|------|-------------|------|-------------|------|
| | | #mod | L(m) | #mod | L(m) | #mod | L(m) |
| 648 | 16 | 17 | 101 | 26 | 168 | 43 | 269 |
| 972 | 20 | 21 | 109 | 31 | 172 | 52 | 281 |
| 972 | 20 (397-600MeV) | 21 | 109 | 26 | 148 | 47 | 257 |
| | 24 (600-1000MeV) | | | | | | |

なる傾向がある。しかし 972MHz の空洞はさらに電場強度 (E_{peak}) を上げられる可能性があり、第二期の 600-1000MeV の範囲で E_{peak} を 24MV/m とした場合は、全長が 257m まで短縮することができる。

ビームシミュレーションは、PARMILA を超伝導リニアックに適応できるように修正したコードで行った。図 4 に 972MHz のケースのエミッタンスを示すが、648MHz でも傾向はほぼ同じである。横方向、縦方向のエミッタンスの増加率は、それぞれ 3%、0% と非常に良好である。とくに、縦方向のエミッタンス増加の抑制は、Equipartitioning の有効性を示すものである。

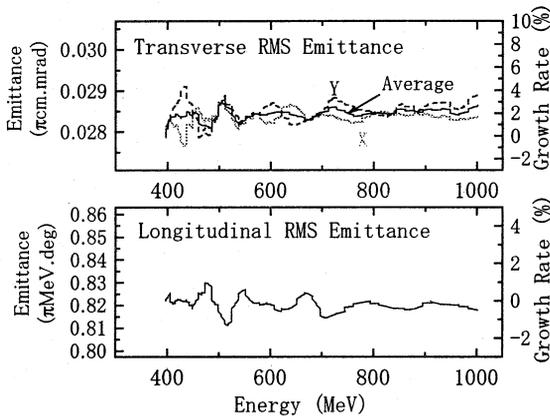


図4 RMSエミッタンス (972MHz)

4. 高周波の制御誤差評価

高周波の制御誤差によるビームへの影響を調べるために、ここでは、出口エネルギーについての検討を行った。評価には、位相や電圧の誤差を乱数で与え、乱数の初期値を変えた多数の計算（ここでは 200 ケース）について、出口エネルギー分布の標準偏差について検討した。

図 5 は位相制御誤差が出力エネルギーに与える影響である。ここでは、第一期における超伝導リニアックからのビームが、シンクロトロンに入射に使えるかの検討として、600MeV の出口部分で評価した。統計的には、平均エネルギーは 600MeV よりも大きく変動しないが、標準偏差は制御誤差の増加につれて大きくなる。同様な検討を電圧制御誤差についても行い、 $\pm 1\%$ の誤差に対して $\sigma = 0.2\text{MeV}$ の結果を得た。

シンクロトロンが必要とする入射ビームの条件は $\Delta p/p$ で $\pm 0.1\%$ であり、これは 600MeV では

$\Delta W = \pm 0.97\text{MeV}$ に相当する。入射部分の常伝導加速部から持ち込む誤差を 0.2MeV、 ± 1 度、 $\pm 1\%$ の制御誤差に相当する σ もそれぞれ 0.2MeV であり、誤差の独立性を仮定すると、

$$\begin{aligned} \sigma &= \sqrt{\sigma_{injector}^2 + \sigma_{AMPerror}^2 + \sigma_{PHerror}^2} \\ &= \sqrt{0.2^2 + 0.2^2 + 0.2^2} = 0.35 \text{ (MeV)} \end{aligned}$$

となり、約 1MeV の許容値に約 3σ で入ることになる。しかしリニアックとシンクロトロンの間に入るデバンチャーのエネルギー幅の評価も全幅に含める必要があり、超伝導空洞における ± 1 度、 $\pm 1\%$ の制御の可能性を含め、今後検討を進める予定である。

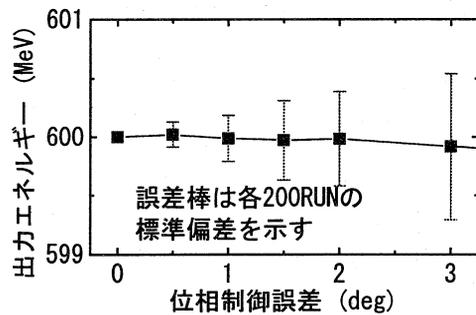


図5 位相制御誤差が出力エネルギーに与える影響

5. まとめ

統合計画用の超伝導陽子リニアックについて、397 から 1000MeV の範囲でシステム設計を行った。648MHz と 972MHz の周波数で検討し、加速器長は、それぞれ 269m、281m である。

ビームシミュレーションにより、横方向エミッタンスの増加率は 3%、縦方向はエミッタンス増加がほとんど無い良好な設計であることが示された。

高周波の制御誤差としては、 ± 1 度、 $\pm 1\%$ でシンクロトロンに入射条件を満たすことが期待されるが、制御方式やデバンチャーの特性など、更に検討が必要である。

参考文献

- [1] M. Mizumoto et al., these proceedings.
- [2] K. Hasegawa et al., J. Nucl. Sci. Technol, 36, pp. 451-458, 1999