

APF-IH 型 Linac の建設

畑 寿起^{A)}、服部 俊幸^{A)}、柏木 啓次^{A)}、高橋 康之^{A)}、山本 和男^{A)}、
土屋 和利^{A)}、上田 晋太郎^{A)}、山田 聡^{B)}、E.Osvath^{C)}、C.Usurelu^{C)}

A) 東京工業大学 原子炉工学研究所 〒152-8550 東京都目黒区大岡山 2-12-1

B) 放射線医学総合研究所 加速器物理工学部
〒263-8555 千葉県千葉市稲毛区穴川 4 丁目 9 番 1 号

C) National Institute for Physics and Nuclear Engineering IFIN-HH
Str. Atomistilor 407, Com. Magurele, jud. Ilfov, P.O.B. MG-6 76900 Romania

概要

本加速器 (以後 SAMURAI [IV]) は電荷対質量比 1/6 以上の重イオンの加速を目的として建設されている。入射エネルギー 30keV/u、出射エネルギー 300keV/u を予定している。以下、表 1 に SAMURAI [IV] 基本パラメータを示す。

表 1 : SAMURAI [IV] 基本パラメータ

Acceleration Particle	P, He ⁺ , C ²⁺ , O ³⁺ , Ne ⁴⁺ , Ar ⁷⁺ , Kr ¹⁴⁺ , Xe ²²⁺ , U ⁴⁰⁺	
Input Energy	30	[keV/amu]
Output Energy	300	[keV/amu]
Number of Cell	32	[cell]
Operation Frequency	100	[MHz]
Cavity Length	1020	[mm]
Cavity Diameter	414	[mm]
Transverse Acceptance	105	[π mm mrad]
Longitudinal Acceptance	35	[$^{\circ}$]

他のキャビティと比較して、特に低 β 領域で格段に電力効率の良い IH (Interdigital-H) 構造及び、低エネルギー領域からビーム収束を行うことが可能な APF (Alternating Phase Focusing) を用いて、SAMURAI [IV] の設計を行った。APF-IH 型線形加速器は突出した加速電場効率と、小型化が可能な加速器として知られる一方、空洞共振とビームエンベロープの不安定性という問題を抱えている。近年の電磁場解析プログラムの発展により、空洞共振については解明されつつあるが、未だビーム加速理論については解明されていない。そこで、現在はビーム安定性に視点を置いて研究を行っている。

現在は SAMURAI [IV] の設計は終え、加速器本体の製作途中である。APF 型線形加速器はドリフトチューブの配置のみで行う収束要素のため、製作精度によりその性能が大きく左右される。製作誤差による影響と現在の状況について報告する。

1 APF-IH 構造

本設計で採用した IH (Interdigital-H) 構造はビーム加速軸に垂直に高周波電場を共振させたものである。ドリフトチューブ間のギャップには π モードの高周波加速電場が集中する。これにより低・中エネルギー領域においては他の線形加速器と比較すると 5 ~ 20 倍強の高加速電力効率を実現する。そのため設計において小型化が可能となる。^{[1][2]}

ビーム収束には APF (Alternating Phase Focus) を採用した。粒子が加速ギャップを通過するとき、高周波電場から Transverse 方向には次のような力が働く。

$$\Delta_{RF} = \frac{\pi e V T \sin \phi}{2 E \beta \gamma^3 \lambda}$$

V は加速電圧、T は transit time factor、E は加速される粒子のエネルギー、 λ は高周波の自由空間波長、 ϕ は高周波の位相である。つまり高周波の位相 ϕ がプラスならば収束、またマイナスならば発散の方向へ力が働く。一方 Longitudinal 方向においては位相 ϕ がプラスならば発散、またマイナスならば収束となる。そこでこの収束・発散を組み合わせるにより、Longitudinal 方向及び Transverse 方向にビーム収束を行う。この方法を APF (Alternating Phase Focus) という。^[3]

2 SAMURAI [IV] の設計

SAMURAI [IV] の設計はモデル機による高周波電磁場特性の測定と粒子軌道計算から行った。その際、最も困難となったのは APF 法によるビームの収束である。APF 法は前述の様に各ギャップで Longitudinal 方向と Transverse 方向に交互に収束または発散を行う。そこで全体的な収束力としては、他の収束法と比較しても決して強いものとは言えない。そのため、リニアックの高いアクセプタンスを維持するためには Longitudinal 方向と Transverse 方向の収束力の成分を慎重に決定することが求められた。^[4] 目標のアクセプタンスは、Longitudinal : 30 [$^{\circ}$]、Transverse : 0.8 [π mm·mrad] とした。一般的な繰り返し位相シークエンスで粒子軌道計算を行った時のアクセプタンス値を以下の表 2 で表す。

表 2 : シミュレーションによる APF 法の位相シークエンスとアクセプタンスの関係

位相シークエンス	Longitudinal Acceptance	Transverse Acceptance
-45,45,-45,45	30°	0.51 π mm·mrad
-30,30,-30,30	30°	0.30 π mm·mrad
-90,45,-45,45, -45	30°	0.63 π mm·mrad
-90,30,-30,30,-30	30°	0.46 π mm·mrad
90, -45,45,-45,45	30°	0.36 π mm·mrad
90,-30,30,-30,30	30°	0.18 π mm·mrad

前述の様に一般的な繰り返し位相による APF 法では SAMURAI [IV] の十分な目標値を満たすことが出来なかった。そこで各ギャップの加速位相を変えて粒子軌道計算を行った。具体的には 1000 回以上の粒子軌道計算を行い、その中で最適なものを設計値とした。設計に用いた加速位相と 設計図を以下図 1 に示す。

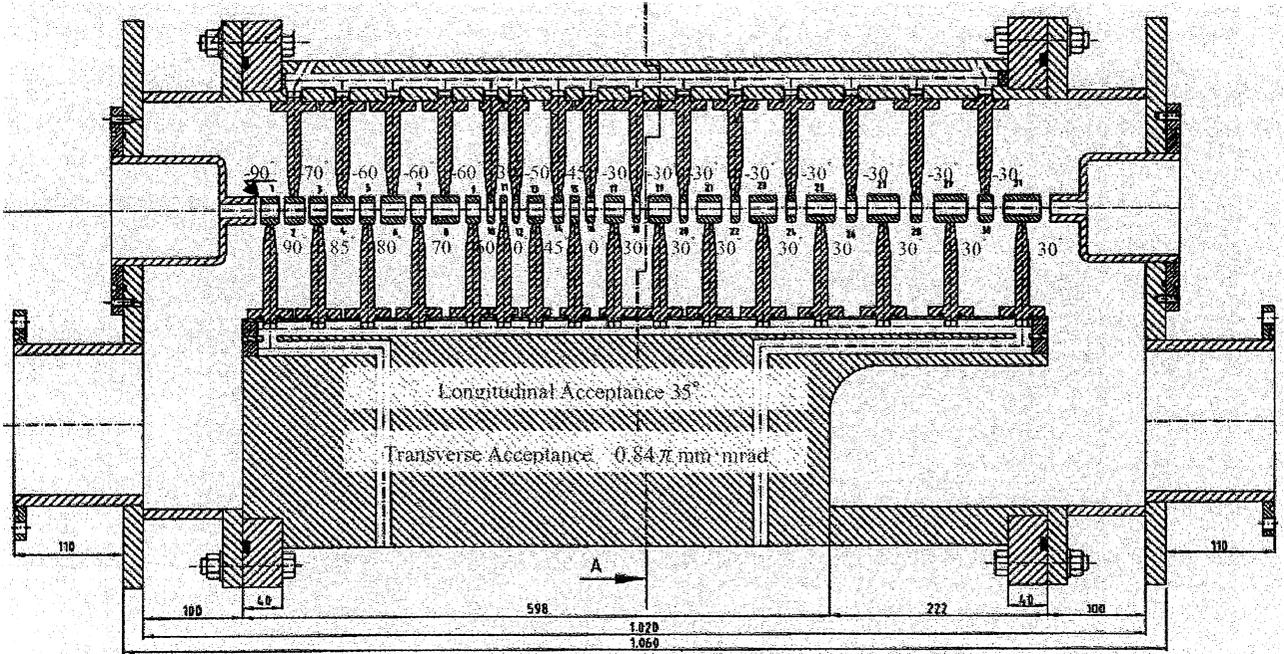


図 1 : SAMURAI [IV] の加速位相と設計図

3 SAMURAI [IV] の製作と精度

前述のように、APF 法では同期粒子の加速位相により、加速器のアクセプタンスが大きく変わる。各加速ギャップでの加速位相の誤差とアクセプタンスへの影響を図 2 に示す。

現在は SAMURAI [IV] はルーマニアでの鍍金前までの製作を完了した。現在までの測定で、ドリフトチューブ及び、キャビティー本体のステム位置等の製作誤差は最大で、0.1mm 程度 (セル長の 0.83%) あることが判った。そこで製作誤差 0.1mm の時のリアックアクセプタンスへの影響を図 3 に示す。

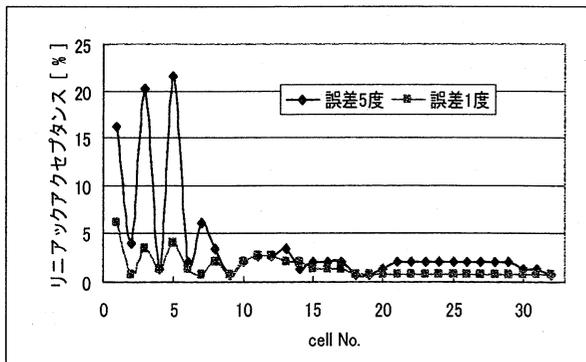


図 2 : 各ギャップでの加速位相誤差の影響

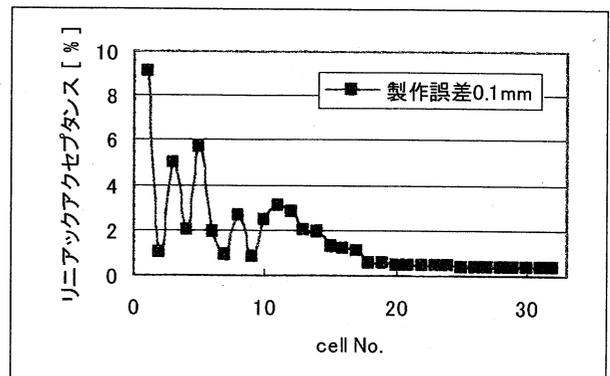


図 3 : 各ギャップでの加速位相誤差の影響

前述の最大製作誤差 0.1mm は 8 セル目にあったのでの図 3 から、約 3% のアクセプタンス誤差があると予測できる。

4 現在の問題と今後の予定

現在最大の問題点と考えられているのはキャビティー内の表面粗さと表面の金属の種類が一定でないことである。表面に 0.4mm 程度の窪みが数点あることに加え、金属が鉄と SUS で構成されているために、銅鍍金が不均一となることが予想される。そこで、キャビティー全体の Q 値が低下すると共に、その部分からの発熱が心配される。

今後は現在のキャビティーの鍍金の問題を解決し SAMURAI [IV] を完成させ、東京工業大学原子炉工学研究所で建設中のビームラインで加速試験を行う。また同時に APF 法で最も困難かつ重要と思われる、加速位相の最適化の問題に取り組んでいく予定である。

参考文献

- [1] T.Hattori, et. al., Nucl. Instrum. Methos B99(1995)807-809.
- [2] K.Isokawa, T.Hattori, et. al., Nucl. Inst. And Meth., A145(1998)287-290
- [3] D.A.Swenson,; Proc. 1976 Proton Linear Accelerator Conference,(1976),pp.234-237
- [4] S.Matsui, T.Hattori, et. al., "The Study of Heavy-Ion Injector IH Linac for Cancer Therapy(IV) ". Proc. 24th Linear Accelerator Meeting , 1999, pp. 152-154