

# 統合計画 ACS リニアックのビーム力学設計

池上 雅紀<sup>1,A)</sup>、加藤 隆夫<sup>A)</sup>、長谷川 和男<sup>B)</sup>

<sup>A)</sup> 高エネルギー加速器研究機構

〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

<sup>B)</sup> 日本原子力研究所

〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2-4

## 概要

高エネルギー加速器研究機構と日本原子力研究所が共同で建設する大強度陽子加速器施設の入射器の高エネルギー部分である ACS (環結合型結合空洞リニアック) と、ACS の直前に設置されるビーム輸送系のビーム力学設計について述べる。

## 1. はじめに

高エネルギー加速器研究機構と日本原子力研究所によって、大強度陽子加速器施設の第一期の建設が始まった [1]。第一期の加速器施設は 400 MeV のリニアック、3 GeV のシンクロトロン、50 GeV のシンクロトロンからなる。この加速器施設の入射器であるリニアックは、出射エネルギーが 3 MeV の RFQ、50 MeV の DTL、191 MeV の SDTL (機能分離型 DTL) [2]、400MeV の ACS (環結合型結合空洞リニアック) [3,4] から構成される。図 1 に、リニアックの構成の概略を示す。RFQ, DTL, SDTL については、RF の周波数として 324 MHz が用いられているが、ACS については、加速勾配を向上させるため、RF の周波数として 972 MHz が用いられている。したがって、SDTL と ACS の間に設置されるビーム輸送系 (MEBT2) において、この周波数の不連続の影響を吸収し、ビームの整合をとる必要がある。

本論文では、ACS リニアックとこのビーム輸送系のビーム力学設計について概略を紹介する。

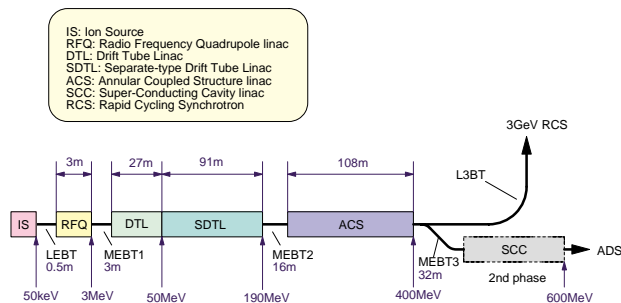


図 1 : リニアックのレイアウト

## 2. ACS リニアック

ACS リニアックは、 $\pi/2$  モードで運転される結合空洞型リニアックの一種であり、加速セル間を電磁氣的に結合する結合セルの形状にその特徴がある。ACS リニアックでは、この結合セルがビーム軸を対称軸とする環状をしており、加速セルと結合セルを結合するためのスロットをビーム軸に対して対称に配置することができる。このことにより、スロットの影響によって加速セル内に生じる電場の非対称性を軽減できると期待される。

本計画で開発している ACS リニアックでは、ビーム軸に対して 4 回対称な位置にスロットが設けられている。本 ACS リニアックは、JHF 計画用に開発された 1296MHz モデル [4] を基礎とし、周波数の変更によるタンク外径の増大を抑えるよう最適化を施したものである。空洞本体の設計については、参考文献 [5] を参照のこと。

本加速器施設の ACS リニアックでは、図 2 に示すような ACS モジュールを 23 モジュール用いて、エネルギーが 191 MeV の負水素イオンビームを 400 MeV まで加速する。1 つの ACS モジュールは 2 つの ACS タンクとそれをつなぐ 1 つのブリッジカプラからなり、1 つのクライストロンによって駆動される。1 つの ACS タンクは 15 の加速セルと 14 の結合セル、2 つの終端結合セルからなる。ブリッジカプラはディスクロード型の構造をしており、9 つのセルをもつ。ブリッジカプラも  $\pi/2$  モードで励振される。RF 電力は、ブリッジカプラの中央のセルに備えられた RF 窓を通して供給される。タンク間のスペースには、横方向の収束を行うための四重極ダブレットが配置される。四重極磁石の仕様は、負水素イオンの磁場によるストリッピングの確率を許

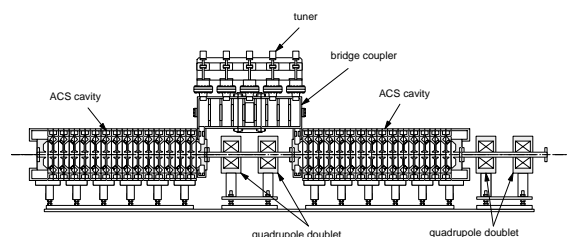


図 2 : ACS モジュールのレイアウト

<sup>1</sup> E-mail: masanori.ikegami@kek.jp

表 1 : ACS リニアックの主なパラメータ

入射エネルギー	190.8 MeV
出射エネルギー	400 MeV
運転周波数	972 MHz
加速粒子	負水素イオン
ピーク電流	50 mA
パルス幅	0.5 msec
繰り返し	50 Hz
1 タンクあたりのセル数	15
1 モジュールあたりのタンク数	2
モジュール数	23
クライストロン数	23
タンク間ドリフトスペース	4.5 $\beta\lambda$
ボア半径	20 mm
平均加速電場 E0	4.26 MV/m
同期位相	-30 度
最大表面電場	0.85 Ek**
ピーク RF 電力	43.8 MW
ピーク壁損失	33.4 MW
ピークビーム負荷	10.4 MW
全長	108.3 m

\*  $\lambda$ : RF の波長、\*\* Ek: キルパトリック限界

### 3 . MEBT2

MEBT2 は、SDTL と ACS の間に設けられる長さ 15.9 m のビーム輸送系であり、その主な役割は SDTL-ACS 間のビームの整合である。縦方向のビームの整合は、MEBT2 に設置された 2 台のバンチャー空洞を用いて行う。バンチャー空洞は、運転周波数 972MHz の ACS 型のものであり、セル数とタンク間隔を除けば、基本的な構造は ACS リニアックと同じである。このバンチャーも 2 つの ACS タンクをブリッジカプラで結合した構成をとっており、1 つの ACS タンクに含まれる加速セルの数は 5、ブリッジカプラのセル数も 5 である。ACS タンク間の間隔は、間に四重極磁石を設置する必要がないため、2.5 $\beta\lambda$  ( $\lambda$  は RF の波長、 $\beta$  は光速でスケールされた粒子速度) としてある。

横方向のビームの整合は、MEBT2 に設置された 12 台の四重極磁石を用いて行う。SDTL、ACS とともに横方向の収束にはダブレットラティスを採用しているが、その収束周期が異なる。MEBT2 では、この収束周期の違いを吸収し、滑らかなビーム整合を実現するため、準周期的なダブレットラティスを採用した。このラティスは基本的にダブレットラティスであるが、周期が下流にいくにしたがって次第に短くなるよう四重極ダブレットが配置されている。図

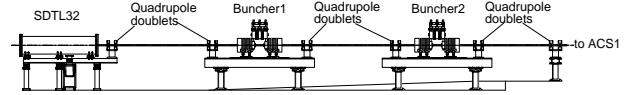


図 4 : MEBT2 のレイアウト

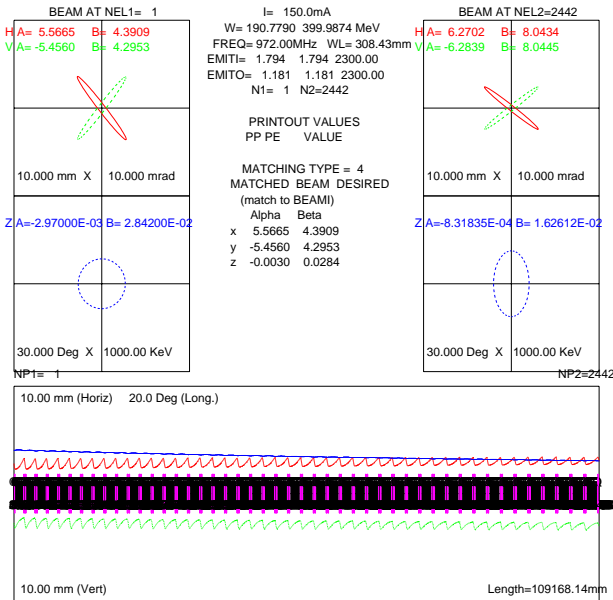


図 3 : ACS の Trace3D による計算結果

容値 ( $10^{-8}/m$  以下) 以内に納めながら、equipartition 条件 [6]を満たすことができるように定めた。表 1 に ACS リニアックの主なパラメータを示す。これらのパラメータは、安定に利用可能なクライストロン電力と、本加速器施設が建設される日本原子力研究所東海キャンパスの地理的制限を考慮に入れて決定された。図 3 に、Trace3D [7]による計算結果の一例を示す。

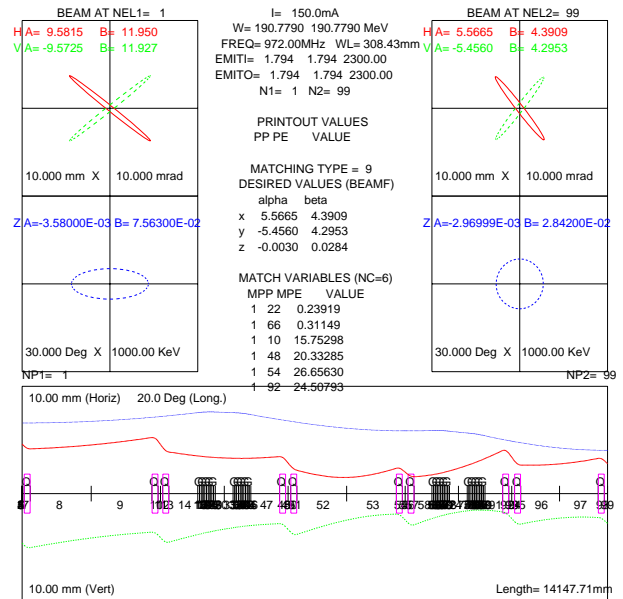


図 5 : MEBT2 の Trace3D による計算結果

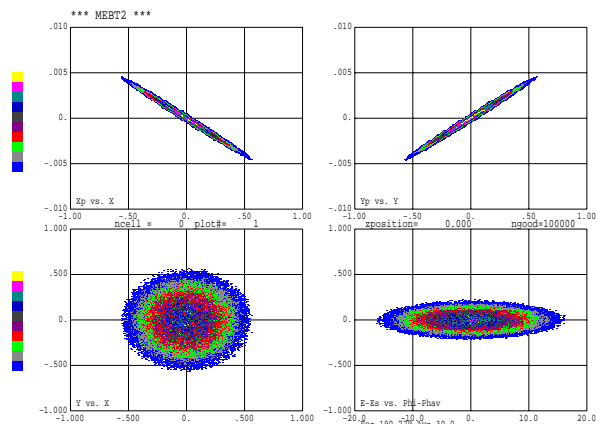


図 6 : MEBT2 入口での粒子分布

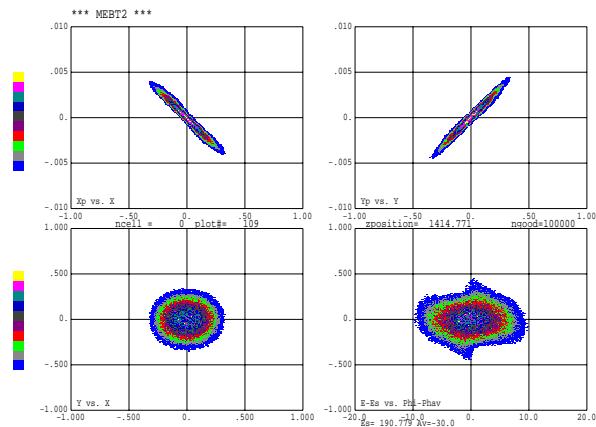


図 7 : MEBT2 出口での粒子分布

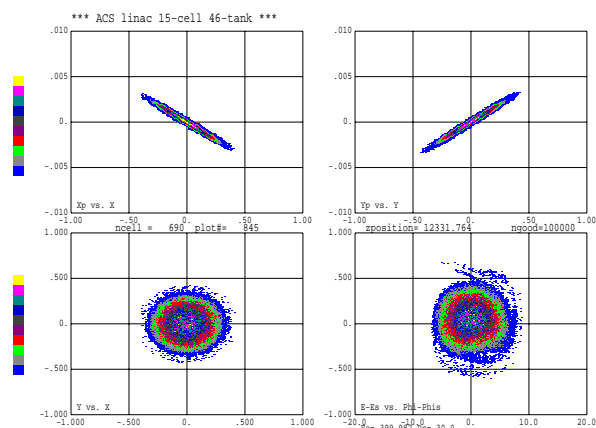


図 8 : ACS 出口での粒子分布

4に、MEBT2のレイアウトを、図5に、Trace3DによるMEBT2の計算結果の一例を示す。図5では、MEBT2の第1ダブレットの中央から第6ダブレットの中央までの結果が示してある。

## 4. 粒子シミュレーション

MEBT2とACSについて、PARMILA [8]を用いた粒子シミュレーションを行った。図6～図8にその結果の一例を示す。このシミュレーションにおいては、空間電荷効果を計算するルーチンとして、PARMILAのもつ3次元particle-in-cellルーチンを用いた。メッシュ数は $40 \times 40 \times 40$ 、粒子数は100000である。MEBT2入り口における初期分布としては6次元のwaterbag分布を用い、RFのエラーや四重極磁石のエラー、入射の不整合などが無い理想的な状況でのシミュレーション結果である。図6はMEBT2入り口、図7はMEBT2出口、図8はACS出口における粒子分布を表したものである。

縦方向については、MEBT2バンチャーでのRF収束力の非線形性に起因すると思われるフィラメンテーションが若干見られるが、rmsエミッタンスの増大はMEBT2、ACSトータルで4%、99%エミッタンスの増大も24%であり、おおむね良好な結果が得られたといえる。また、横方向については、rmsエミッタンスの増大は6%、99%エミッタンスの増大も24%である。

## 5. まとめ

高エネルギー加速器研究機構と日本原子力研究所が共同で建設する大強度陽子加速器施設の入射器の高エネルギー部分であるACS(環結合型結合空洞リニアック)と、ACSの直前に設置されるビーム輸送系のビーム力学設計を行った。PARMILAを用いた3次元の粒子シミュレーションを行い、エラーや入射の不整合が無い理想的な状況では良好な結果が得られた。今後、エラーの影響の評価を系統的に行う必要がある。

## 参考文献

- [1] 伊藤 崇, in these proceedings.
- [2] T. Kato, "Proposal of a Separate-type Proton Drift Tube Linac for Medium Energy Structure", KEK Report 92-10 (1992).
- [3] V. G. Andrejev et al., "Study of High Energy Proton Linac Structures", Pros. of the 1972 Proton Linear Accelerator Conference, p. 114 (1972); R. A. Hoffswel and R. M. Laszewski, "Higher Modes in the Coupling Cells of Coaxial and Annular-Ring Coupled Linac Structures", IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-30, 3588 (1983).
- [4] T. Kageyama et al., "Development of Annular Coupled Structure", Procs. of the 1994 Linear Accelerator Conference, p. 248 (1994).
- [5] V. V. Paromonov, "The Annular Coupled Structure Optimization for JAERI/KEK Joint Project for High Intensity Proton Accelerators", KEK Report 2001-14 (2001); 林崎 規託他, in these proceedings; 青 寛幸他, in these proceedings.
- [6] R. A. Jameson, "Beam Intensity Limitations in Linear Accelerators", IEEE Trans. Nucl. Sci. NS-28, 2408 (1981); M. Reiser, "Theory and Design of Charged Particle Beams", John Wiley and Sons, 1994.
- [7] K. R. Crandall, "TRACE: An Interactive Beam Dynamics Code", in *Linear Accelerator and Beam Optics codes*, ed. Charles R. Eminheiser, AIP Conference Procs. 177, 29 (1988).
- [8] H. Takeda, "PARMILA", Los Alamos National Laboratory Report, LA-UR-98-4487 (1998).

