

SIMULATION STUDY ON BEAMLOSS AT J-PARC LINAC BY USING GEANT4

Tomofumi Maruta[#]

J-PARC Center, JAEA

2-4 Shirakata-Shirane, Tokai-mura, Ibaraki, 319-1195, JAPAN

Abstract

Suppression of beamloss is one of the most important issues to operate an accelerator stably for a long term, because beamloss makes accelerator components radioactivated and a high radioactivation becomes an obstacle for maintenance works by hand. One of the major origins of the beamloss is the scattering process of beam particles (H^- for J-PARC Linac) to residual gases inside the beam duct. For the study on the beamloss coming from the H^- scattering process, I developed a library that can handle H^- scattering process by Geant4 toolkit. In this proceedings, I will introduce parameters, especially for mass and cross section, in the library and show some results of the Geant4 simulation with the library.

Geant4によるJ-PARCリニアックのビームロスの研究

1. はじめに

J-PARC 加速器施設は MW クラスの大強度陽子加速器施設である。線形加速器(リニアック)は J-PARC 加速器施設の初段加速器である。イオン源で生成された 50keV の負電荷水素イオン(H^- : 陽子 1 個に電子 2 個が束縛されたイオン)を 181MeV まで加速し、3GeV RCS に 25Hz で供給する。現在、供用運転中のビーム強度は約 200kW(ビーム電流 15mA)であり、設計値の 1MW 達成に向けて、徐々にビーム強度の向上を図っている。

大強度陽子加速器にとって重要な課題のひとつは加速器機器の放射化の抑制である。特に 100MeV 以上の陽子や重粒子が物質に衝突すると、強い相互作用によりハドロンシャワーを起こし、大量の 2 次粒子を発生させるため、機器の残留放射線が高くなる。高い残留放射線は手作業によるメンテナンスに時間的な制約を与えるので、加速器の安定的な運用にとり大きな障害になる。手作業によるメンテナンス性を維持できる残留放射線量の上限は 1mSv/h と言われている。一方、現在の残留放射線量は、昨年 12 月 27 日に行われたリニアックトンネル内の測定によると、デバンチャー 2 の直前にあるゲートバルブが一番高く、0.40mSv/h。次に高いのがデバンチャー 1 入口で 0.19mSv/h だった。これらの測定結果は指標の半分以下だが、今後ビーム強度が高くなるに従い、残留放射線も高くなると予想される。したがってビームロスの原因を究明し、残留放射線の抑制に努めなければならない。原因究明にとって、シミュレーションツールは強力な手段となる。

放射化はビーム粒子が何らかの原因により通常の軌道から離れ、やがて加速器機器に衝突することにより発生する。軌道から外れる原因はいくつかあるが、J-PARC リニアックで現在考えられている最大の要因はビーム粒子と残留ガスの散乱である。 H^- は散乱すると電荷 0 の H^0 になる。散乱は物理事象な

ので、シミュレーションは粒子の質量、電荷、散乱断面積等の物理量に基づき行わなければならない。その条件を満たす有力なツールの一つに Geant4 ツールキットがある。

Geant4 ツールキット^[1]は KEK や欧州原子核研究機構 (CERN) が中心となり、国際共同で開発が進むシミュレーションキットである。モンテカルロ法により粒子の物理発展を step-by-step に計算する。Geant4 内には様々な物理量や散乱モデル等が、過去の実験結果・理論計算を基に定義されている。したがって散乱起因のビームロスの研究に最適なツールの 1 つである。しかしながら Geant4 では H^-/H^0 が定義されていないので、リニアックの加速段階のシミュレーションが困難だった。

本発表では、わたしが Geant4 でリニアックのシミュレーションを行うために開発した H^-/H^0 のライブラリについて報告する。特に散乱断面積(σ)の定義について説明する。またライブラリが断面積の測定結果をどの程度再現するか示す。また、そのライブラリを使用して SDTL 入射点から ARC セクション手前の直線部 (~250m) のシミュレーションを行ったので、その結果について報告する。

2. Geant4 用 H^-/H^0 ライブラリ

Geant4 で定義されていない粒子を使用するためには、目的に応じて物理量を定義する必要がある。本研究の目的は散乱事象のシミュレーションであり、そのために最低限必要な物理量(質量、電荷、散乱チャンネルおよび各チャンネルの σ)を定義した。散乱チャンネルは $H^- \rightarrow H^0 + e^-$ と $H^0 \rightarrow H^+ + e^-$ を考慮した。 H^- の散乱には $H^- \rightarrow H^+ + 2e^-$ もあるが、 σ が他の 2 つと比較して 2 桁以上小さいので、ここでは考慮しない。次に質量と σ について説明する。

すでに述べたように、 H^-/H^0 は H^+ に 2 個ないし 1 個の電子が束縛されたイオンである。各電子の束縛エネルギーはよくわかっており、13.6eV、0.75eV である。したがってライブラリでは、各イオンの質量

[#] tmaruta_at_post.j-parc.jp “_at_”を“@”に置き換えること。

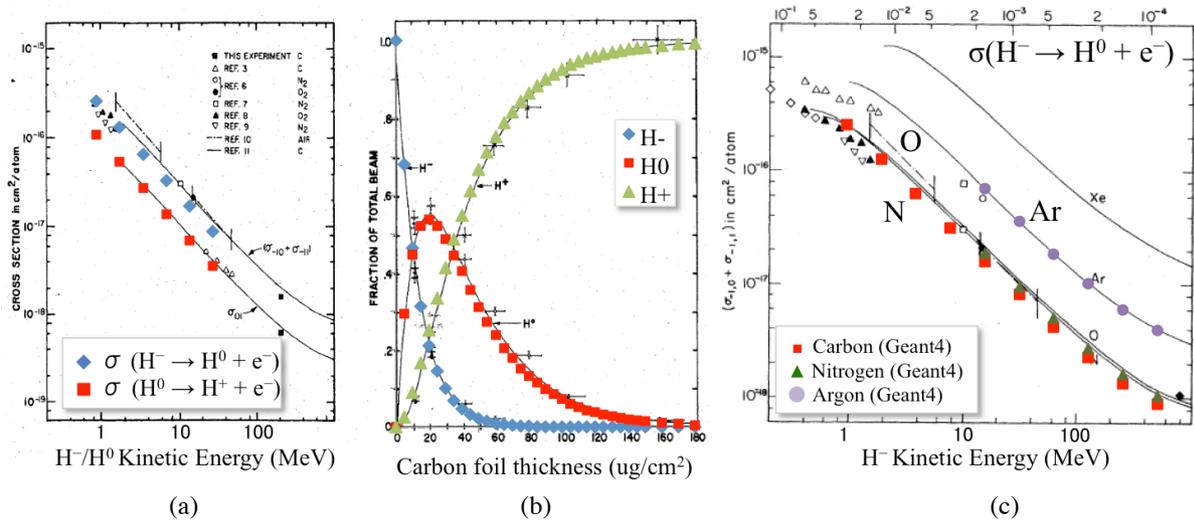


図1：参考論文に記載されている H/H⁰ の散乱断面積の図^[2,3]に、製作したライブラリを使用して Geant4 から導出した散乱断面積を重ね合わせた。黒点は測定値、実線が理論計算。黒点以外は Geant4 の計算結果である。図中の σ_{ij} の意味は本文参照。(a)：炭素薄膜に H を照射して測定した $\sigma_{-1,0} + \sigma_{-1,1}$ と $\sigma_{0,1}$ と H- のエネルギーの相関。(b)：200MeV の H⁻ ビームを 10ug/cm² から 200ug/cm² 厚の複数の炭素薄膜に照射し、通過後の H/H⁰/H⁺ の割合。(c)：炭素、窒素、アルゴンの $\sigma_{-1,0}$ のエネルギー依存性。

に H⁺ と e⁻ の質量の和から電子の束縛エネルギーを差し引いた値を定義した。

σ は実験結果等を参考に、入射粒子の運動エネルギー(E)と物質の原子番号(Z)を独立変数に持つ関数 $\sigma(E, Z)$ として定義した。まず H⁻ ビームを炭素薄膜に照射した実験結果^[2,3]から、E に依存する項を求めた。次に他の物質の測定結果^[3,4]から標的の Z に依存項を求めて $\sigma(E)$ を $\sigma(E, Z)$ に拡張した。

図1に参考論文中に示された σ と、ライブラリを使用して Geant4 で求めた σ を示す。図中の σ_{ij} は、Hⁱ が H^j になる σ を示している。各図において、黒点は測定結果、実線は理論計算、黒色以外の点は Geant4 の計算結果である。(a)、(b)は標的に炭素を用いた場合の E および標的厚依存性であり、両方とも Geant4 は実験結果を良く再現している。また(c)は炭素標的に加えて、窒素とアルゴン標的の比較だが、これらに関しても一致しており、Z による補正がよく機能していると考えられる。

3. ビームロスシミュレーションの結果

次に製作したライブラリを使用して、ビームロスのシミュレーションを行ったので、その結果について報告する。概要は以下の通りである。

- 区間：SDTL 入射点(E=50MeV)からデバンチャー2 下流(181MeV)の約 250m。
- 構成要素：図面等を基に、ビームダクト、Q 磁石、RF 空洞の形状と材質を定義。各要素を設計位置に配置した。また、ビームダクト内は 10⁻⁵Pa の一様な窒素ガスで満たした。
- Q 磁石の磁場：磁場勾配は現在の供用運転と同じ 15mA の設計値を使用した。また分布は PMQ モデル^[5]を採用した。

- 加速電場：すべての加速ギャップ間に 324MHz の電場を発生させた。電場分布はビーム軸方向のみに成分を持つ理想的な電場である。各電場の初期位相と振幅は、位相スキャン法により初期位相と空洞出口のビームエネルギーの相関を求め、同期位相が設計値の-27° になるように設定した。
- H⁻ ビームの初期分布：15mA 運転用のパラメータから Trace3D^[6]で SDTL 入射点の twiss parameter を求め、それを再現するように生成した。ビームを実空間に射影した時の分布はガウス関数である。H⁻ の発生数は 7×10⁵ 個である。

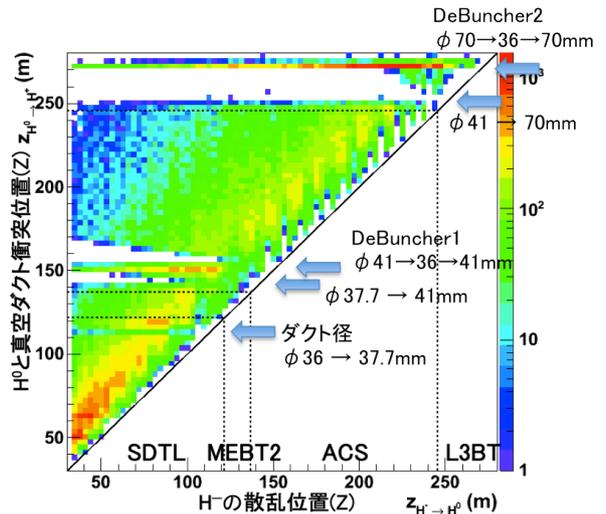


図2：ビーム軸上の H⁻ の散乱点と H⁰ の散乱点の相関。

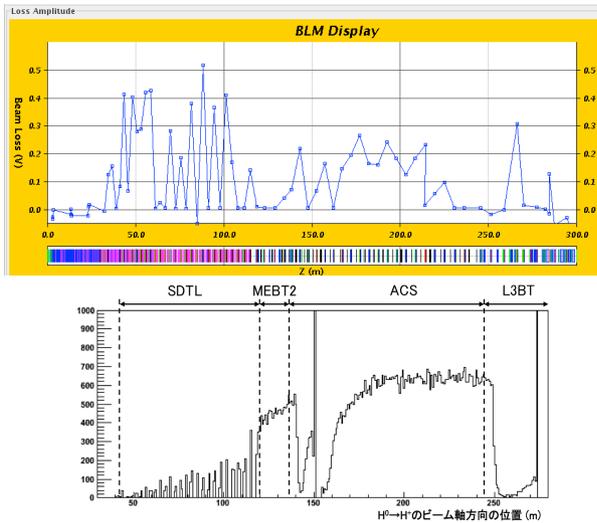


図3：加速器運転中の BLM 信号 (上) と Geant4 で求めた H⁰ 散乱位置 (下) の比較。

- 散乱断面積：散乱事象の収集効率を上げるため、 $\sigma_{-1.0}$ を 1000 倍にした。従って散乱事象数は 7×10^8 個の H と同等である。

図2に H が散乱して H⁰ が発生したビーム軸上の位置 (横軸) とその H⁰ が散乱した位置 (縦軸) の相関を示す。SDTL 上流で散乱数が多いのは、E が高くなるにつれて、 σ が急激に小さくなるためである。H と H⁰ の位置の相関を比較すると、H⁰ が H より約 30m 下流側で散乱していることが分かる。これは H⁰ が生成点から真空ダクトに衝突するまでに約 30m 飛行していることを意味している。従ってビームロスモニター(BLM)は設置場所よりも約 30m 上流で散乱した事象を観測している。

分布では 145m、160m、260m の辺りに H⁰ が散乱していない領域がある。これはビームダクト径が大きくなっている場所と一致する。ダクト径が大きくなると、その上流側の細いダクトの陰になり H⁰ が衝突しないためである。一方 150m と 270m で横方向に赤い筋がある。ここはそれぞれデバンチャー1 とデバンチャー2 に対応する。これらの空洞はもともと SDTL の最下流部の 2 空洞として設計されたため、

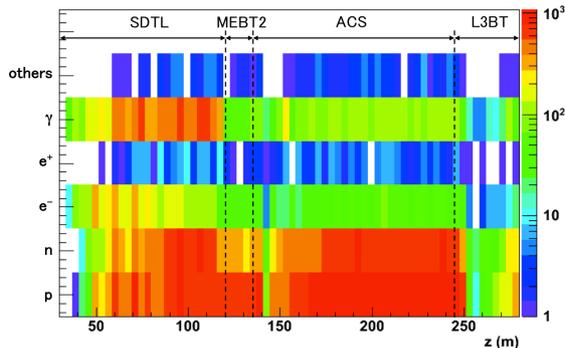


図4：ビームロスによりビームダクトから出てくる粒子の種類。ここでは陽子、中性子、電子、陽電子、 γ 線、それ以外に分類した。

Drift Tube の内径がその上流のダクト径より細くなっており、そこに H⁰ が集中的に衝突していると考えられる。

次に図3にビーム運転中の BLM の分布 (上) と H⁰ のビーム軸方向の散乱位置 (下) を示す。SDTL セクションでは空洞内で発生した X 線を検出しているので BLM 信号が全体的に大きい。下図で 2 カ所鋭くピークになっているのは、先に述べたデバンチャー1、2 の入口である。1 章で述べたが、ビーム運転終了後の残留放射線測定でも、この 2 カ所が高くなっており、同じ傾向を示している。上下を比較すると、位置はずれているが、それぞれ 2 区間でロスが小さく、似た傾向を示している。BLM では MEBT2 と ACS 後半が小さく、一方 Geant4 では ACS 上流と L3BT 上流が小さい。両方とも Geant4 の方が 30m 程度下流側にシフトしている。原因は、Geant4 では空間電荷効果を考慮していない。初期分布が実際と異なる、など考えられる。

図4はビームダクトから出てくる粒子の位置と、種類を示したものである。陽子に加えて、中性子が全区間で発生していることがわかる。中性子は荷電粒子と異なり、透過力が高いので、RF 空洞内で発生したロスの検出に有効だと考えられる。2013 年夏に予定される 400MeV 増強では、ACS セクションに 21 台の空洞が設置されるため、現在の BLM ではロスの検出が難しくなる可能性が高い。したがって中性子検出器の使用も検討の必要があると言える。

4. まとめと今後

Geant4 で H および H⁰ をシミュレーションするためのライブラリを製作した。Geant4 簡単なシミュレーションを実行し、散乱断面積が参考論文とよく一致することを確認した。このライブラリを使用しシミュレーションではデバンチャー1 と 2 の入口付近で H⁰ が集中的に衝突しており、これはビーム運転後の残留放射線測定の結果と一致している。ビームダクト外のロス起因の粒子は陽子に加えて、中性子もかなり多い。中性子は透過力が高いので、空洞内のビームロスの検出に有効である。

今後は空間電荷効果やローレンツストリッピング等をシミュレーションに組み込むとともに、残留放射線の測定結果等と定量的な比較をおこなう。

参考文献

- [1] <http://geant4.cern.ch>
- [2] C. Webber and C. Hdjvat, IEEE Transaction on Nuclear Science, Vol. NS-26
- [3] H.Gillespie, Phys. Rev. A16 (1977) 943.
- [4] R.E. Shafer “Beam Loss from H-minus Stripping in the Residual Gas”, LANSCE-1 Technical Note, LANSCE-1:99-085
- [5] K. Halbach, Nucl. Inst. Meth. 187 (1981) 109.
- [6] http://laacg.lanl.gov/laacg/services/download_trace.p.html