

加速器・ビーム科学部会セッション

モンテカルロシミュレーションと加速器
Monte Carlo Simulation and Particle Accelerator

(2) J-PARC 加速器におけるモンテカルロシミュレーションの利用

(2) Application of Monte Carlo simulation in J-PARC accelerator system

*山本 風海¹¹ 日本原子力研究開発機構 J-PARC センター

1. はじめに

大強度陽子加速器施設 J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) は、最大 1 MW という大強度陽子ビームから中性子、ミュオン、ニュートリノ、K 中間子などの多彩な二次粒子ビームを作り出し、多種多様な物理実験の実施と研究推進を目的とする研究施設である。J-PARC 施設は茨城県東海村の日本原子力研究開発機構 (JAEA) 原子力科学研究所施設内に建設され、利用運転開始から 10 年が経過している。J-PARC は 400 MeV の常伝導リニアック、25 Hz という早い繰り返しの 3 GeV シンクロトロン (Rapid Cycling Synchrotron, RCS), 30 GeV まで加速する主リングシンクロトロン (Main Ring, MR) の 3 台の加速器と、RCS のビームを使ってミュオンおよび中性子実験を行う物質生命科学実験施設 (Material and Life science experimental Facility, MLF), MR のビームを用いてスーパーカミオカンデに向けてニュートリノを飛ばし、長基線実験に供するニュートリノ実験施設, MR ビームで中間子を生成し主に強い相互作用に関する実験を行うハドロン実験施設、の 3 つの実験施設から構成されている。

J-PARC のような高エネルギー、高出力の陽子加速器では、運転中のビームロスにより機器が放射化することで故障率が上がり、保守作業時に作業者が被ばくする事になる。これにより、ビーム強度はこれ以上ロスが発生すると作業者の被ばく量が許容できなくなる、という処で制限を受けることになる。そのため、1 MW という大出力を達成するためにはビームロスの対策が必須であり、J-PARC 加速器では設計段階からシミュレーションを用いて対策を検討してきた。本稿では主に RCS の設計を題材として、モンテカルロシミュレーションの利用例について報告する。

2. 加速器と計算機シミュレーション

RCS での具体的なモンテカルロシミュレーションの利用例の前に、まず加速器の設計において用いられる計算機コードについて述べる。そもそも加速器では、電磁相互作用を用いて荷電粒子をコントロールし加速する。そのため、加速器の設計では 1) 荷電粒子が磁場中で想定している安定な軌道上を運動することや、加速電場によって安定に加速できることを確認するための粒子トラッキング、2) それら安定な軌道を得るための、電磁石や加速管が作る磁場、電場の評価、の二つの計算をまず行う必要がある。

1) に関しては、ローレンツ力を受ける荷電粒子の運動方程式①を解くことで求めることができる。

$$m \frac{dv}{dt} = q(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad \dots \textcircled{1}$$

理想的な一様電場・磁場分布の条件であれば、解析的に解を求めることができるが、一般にはそのような条件は作ることができず、また大強度ビームでは荷電粒子同士の空間電荷の影響も考慮する必要がある。そのため、実際上は①式は計算機を用いた Runge-Kutta 法等の数値積分を実行することで解くことになる。

2) に関しては、軌道計算に用いるような理想的な電場・磁場の条件に実際の電磁石や加速管内の電磁場分布を近づけるため、Maxwell 方程式を解きそれらの形状を最適化することになる。こちらに関しても、実際に必要な理想に近い電磁場分布を作るためには、電磁石や加速管の形状が複雑になるため、解析解は求められず、有限要素法を用いたシミュレーションを実行することになる。これら粒子の運動や電磁場の分布は、古典力学的・決定論的な因果律に基づいた方程式で記述されるため、加速器の設計においてモンテカルロシミュレーションはこの段階までは用いられない。

一方で、電磁場の設計からのズレや装置の設置誤差などの不確定要素によって、ビームは計算上の軌道から外れて真空容器に衝突しビームロスとなる。あるいは、設計通りに加速されたビームについては、最終的には二次粒子を生成するためのターゲットに入射することになる。これら、ビームと物質との相互作用の影響について評価するためには、モンテカルロシミュレーションが必要となってくる。RCS では、ビームロスを局所化するコリメータの設計検討や、あるビームロス想定のもとで評価した加速器トンネルの遮蔽設計等にモンテカルロシミュレーションが活用されている。以下、その具体例を述べる。

3. J-PARC RCS でのモンテカルロシミュレーションの利用例

2-1. コリメータ設計

はじめに、でも述べたように、RCS のような高エネルギーの陽子シンクロトロンでは、運転中のビームロスが機器の放射化を引き起こす原因となり、運転できるビーム強度はそのビームロス量によって制限を受ける。そのため、1 MW という大出力を達成するために、RCS では設計段階から放射化をできる限り低減するため様々な対策を講じており、その一つとしてビームロスを局所化できるようにアパーチャを狭めたコリメータを導入している。RCS のコリメータは、加速初期に3%のロスが発生するという仮定の基に、ビームを廃棄するダンプや物理実験で使用されるターゲットに相当するような4 kW という大容量で設計した。このコリメータの設計は、フェルミ国立研究所で開発されたSTRUCT コードおよびMARS コードを用いて行った。

STRUCT コードは転送行列による粒子トラッキングを行い、粒子のX、Z座標が設定された各機器のアパーチャの値より大きくなった際には真空容器壁に衝突したものと判断し、その影響の評価に進む。影響評価では、クーロン多重散乱についてはMolière分布、エネルギーロスに関してはLandau分布に従うものとして、疑似乱数を用いて散乱角度とエネルギーを求め、粒子のエネルギーが所定の値以下になった時点でビームロスしたと判断し、その座標を出力ファイルとして出す。このSTRUCT コードによって、シンクロトロンを周回する間にどこでロスするのか評価できるため、コリメータにロスが集中するようパラメータの検討を行った。

他方のMARS コードは、物質中でのハドロン電磁カスケードをシミュレーションするコードで、その特徴として計算結果に対する寄与の大きいエネルギーや粒子種について優先的にサンプリングする方法(Leading Particle Biasing)を採っている。また、原子核との相互作用の評価では、核内カスケード・蒸発モデルに基づく核内過程の詳細計算ではなく半経験式を用いているため、計算速度が非常に速く、高エネルギーや深層透過計算に有利である。このMARS コードを用いて、コリメータに陽子ビームが当たった際の二次粒子の生成量や残留線量の評価を行い、保守作業が可能なレベルに残留線量を抑えるために必要な遮蔽構造の設計を行った。

コリメータの設計については、実際のビーム運転後の線量分布と比較を行うことで、その設計の妥当性を評価し、所定の性能を発揮していることを確認した。

2-2. 遮蔽設計、許認可申請

加速中に発生するビームロスに関しては、かなりの部分は前述のコリメータに集中できるが、1%程度はコリメータから漏れ出てきて他の機器に衝突する。また、ビーム入射時や出射時に発生するロスも、コリメータに局所化することはできず入射機器に集中する。このため、コリメータに局所化した分も含め、加速器運転中は加速器トンネル内に放射線が飛び交う事となり、管理区域として外部に放射線が漏れないようにトンネルの遮蔽設計を行う必要がある。RCS では、トンネル躯体設計の際にはMARS コードを用いて遮蔽に必要な厚さを決定した。また、放射線発生装置として許認可申請を行ったが、その際の計算にはPHITS コード及びMCNPX コードを用いて詳細評価を実施している。これらの計算は、以下のビームロス想定の下で実行した。1) 入射部で1 kW、2) リニアックで加速したHから電子二個を剥ぎ取り、陽子に荷電変換してRCSに入射するが、その際に荷電変換し損なったHやH⁰粒子を廃棄する入射部ダンプで4 kW、3) 出射部で100 W、4) コリメータで4 kW、ただしロスはSTRUCT コードで求めた分布でコリメータおよびその他加速器機器に分布するものとする、5) ビームライン1 mあたり1 Wの様なロス、6) 出射部にビーム調整に使用する出射部ダンプ8 kW。

また、入射部ダンプに関しては、MARS コードで得られた発熱分布をもとに、躯体のコンクリートの温度

が強度低下を起こす 60 °C まで上昇しないよう構造設計を行なった。

2-3. 入射部で発生したロスの対策検討

RCS において、連続ビーム供用運転が開始されてから最初に高い線量が観測されたのは、入射用荷電変換フォイルより 5 m 程度下流の、ダンプビームラインと周回軌道を分岐するためのダクト、および、その下流であった。このダンプビームラインは入射時に陽子に変換し損ねた H⁺や H⁰を、廃棄用のダンプまで輸送するためのものである。周回軌道と、これらの廃棄ビームの分離ために、分岐ダクトにはセプタム電磁石を組み込む必要があるため、この部分の真空容器の口径は、周辺よりも小さくなっている。フォイルでの散乱の影響について、GEANT4 を用いて評価したところ、10⁻⁶ 程度の割合で大角度に散乱される粒子が存在し、その散乱粒子がこの口径が狭まった箇所集中して当たっていることを突き止めた。また、比較的散乱角が小さい粒子は、この分岐部を通過して、その下流のビーム位置モニタに当たることが散乱粒子の軌道計算から判った。この結果を基に、分岐部のダクトにコリメータを組み込むことで散乱粒子をそのコリメータに局所化し、さらに分岐ダクトとコリメータを遮蔽体で覆うこととした。この分岐部コリメータと遮蔽体の設計でも STRUCT コードおよび MARS コードを利用し、最終的にそのコリメータを設置することで、残留放射能の影響を抑えることに成功した。

4. まとめ

J-PARC のような大強度陽子加速器施設においては、ビームによって引き起こされる放射化は避けられない課題であり、設計段階での評価、運転開始後に発覚した問題の解決において、モンテカルロシミュレーションは大きな役割を果たしてきた。今後、さらなる大強度化を進めるうえでも、その高度化と精度、ユーザビリティの向上は重要であると考えられる。

*Kazami Yamamoto

¹J-PARC center, JAEA