

ILC 国際リニアコライダー建設に向けた高エネルギー粒子加速器での放射線遮蔽実験

中尾 徳晶 上菘 義朋 福田 和寛
(技術研究所) (技術研究所) (土木技術本部)

Radiation Shielding Experiment with a High-Energy Particle Accelerator for Constructing the International Linear Collider

Noriaki Nakao, Yoshitomo Uwamino and Kazuhiro Fukuda

国際リニアコライダー(ILC)施設は、全長 20km の地下トンネル内に直線粒子加速器を設置し、電子とその反物質である陽電子をそれぞれ両端から 125GeV に加速する。両者を中間点の検出器で互いに衝突させ、衝突のエネルギーによって生成されるたくさんの粒子を精密に測定し、新たな粒子の発見や未知の物理現象を解明しようとする素粒子物理実験施設である。建設総工費 7,400~8,000 億円程度と見積もられ、岩手県北上山地が有力な建設候補地となっている。この ILC 建設の放射線遮蔽設計に適用できる新たな技術提案を目指して、放射線遮蔽解析シミュレーションの精度検証や遮蔽設計の高度化を進めている。これに資する実験データ収集を目的として、CERN 欧州原子核研究機構において、高エネルギー陽子により発生した中性子による遮蔽透過実験を行った。

The International Linear Collider (ILC) is a particle physics experimental facility for studying unknown physics phenomena and discovering new particles. A large number of linear accelerator components will be placed inside an underground tunnel of 20 km length. Additionally, electron and positron beams from both ends will be accelerated up to 125 GeV and will be collided at the center of a particle detector to investigate particles produced by collision energy. The Kitakami Mountain Range in the Iwate prefecture is the first candidate location for the facility. Its total construction cost is estimated to be in the range of 740–800 billion yen. To develop new technologies that can be applied for the radiation shielding design of the ILC project, accuracy validation of radiation transport simulation and upgrade of advanced shielding design should be conducted. To collect experimental data for the accuracy validation, a shielding experiment was performed at CERN using neutrons generated by a high-energy proton beam.

1. はじめに

粒子加速器で生成されるビームは、ガン治療等の医療目的、物質のマイクロ構造の視覚化、宇宙・素粒子・原子核物理等の先端科学探求に盛んに利用されている。

世界の主な粒子加速器の分類を図-1に示す。粒子加速器は、主に電子線、陽子線、重粒子線を加速してビームを利用する装置である。図-1の縦軸には最大加速エネルギーが対数で示されている。そのエネルギーレベルは多様で、特に物理実験で用いられる粒子エネルギーは、他の用途に比べて数桁高いのが特徴である。

高エネルギー物理実験の分野では、スイスの欧州原子核研究機構(CERN)および米国のフェルミ国立加速器研究所(Fermilab)で、陽子を用いて既に1TeV

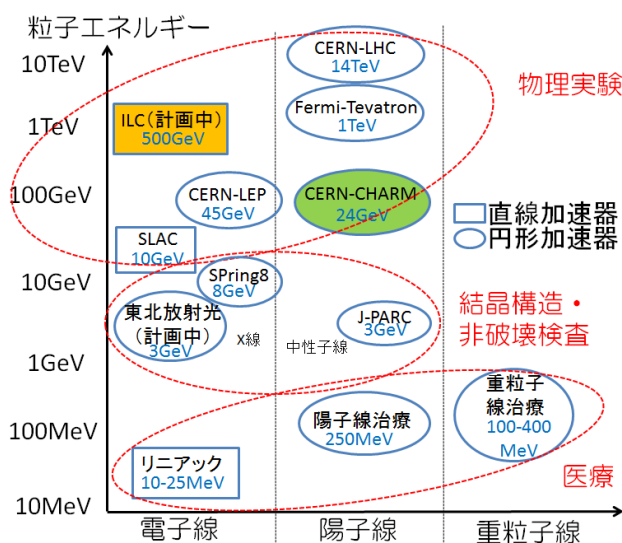


図-1 高エネルギー粒子加速器の分類

(テラ電子ボルト)以上の加速器が実現しているが、いずれも円形加速器である。電子線を用いると、電子自体が素粒子であるため、よりクリーンな実験が可能であるが、曲がる際に放射光を放出して大幅にエネルギーが減少するため、円形で加速するには限界が存在する。そのため、高エネルギー電子加速器の場合、直線で加速する必要がある。

加速粒子が衝突した際に生じる二次粒子が高速(高エネルギー)で飛び散ることで、これもまた粒子線(放射線)となり、これらが様々な方向や箇所(図-2)に散らばり、物質中を透過し衝突を繰り返す。その結果、遮蔽体の外にも放射線をもたらすとともに、物質中に放射能を形成(放射化)する。これらの反応確率や生成粒子の種類・量・エネルギーは、加速エネルギーに応じて変化する。そのため、新たなエネルギーの加速粒子に対して、それらの情報を収集して、安全を担保した施設設計を行う必要がある。しかしながら、初めてのエネルギー領域に対しては、実験が困難で実験値も存在しないため、これにできるだけ近いエネルギー領域の加速粒子ビームを用いて実験値を蓄積し、理論計算の検証を行って行く必要がある。

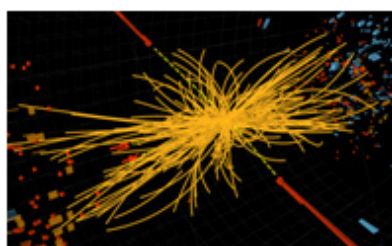


図-2 加速粒子の衝突により生成した粒子の飛跡

ILCの電子ビームは、放射線遮蔽の核データの実験値が非常に不足しているエネルギー領域である。ILC施設建設の遮蔽設計に適用できる新たな技術提案を目指して、それに資する実験データ収集を目的に、これまで欧州原子核研究機構(CERN)において遮蔽透過実験を行ってきた。この高エネルギー陽子により発生した中性子が遮蔽体を透過し減衰する実験データを収集して、現在使われている理論計算やシミュレーションの精度検証を行い、遮蔽設計高度化を目指している。

2. 国際リニアコライダー(ILC)計画

ILCは地下トンネル内に長大な直線加速器を配置し、電子と陽電子をそれぞれ加速して正面衝突させ、生成粒子を中央の大型検出器で精密に測定する高エ

ネルギー物理実験装置である。2004年、純粋・応用物理学国際連合(IUPAP)のもとに世界の主要加速器研究所所長と代表研究者で構成される将来加速器国際委員会(ICFA)が設置され、欧・米・アジア(日本)の3極の協力のもと、電子・陽電子衝突実験を行う直線加速器の実現を目指すことが決議された。当初は、質量の起源とされる「ヒッグス粒子」の解明や新たな粒子の発見を目指して、トンネル延長約30km、衝突エネルギー500GeVが計画されていた。2012年、欧州加速器研究機構(CERN)においてヒッグス粒子が発見されたことで、ILCは当面ヒッグス粒子の精密測定に特化することとして、トンネル延長20km、衝突エネルギー250GeVに計画が見直された。将来的には全長を30km(350 GeV)、50km(500 GeV)と言うように、段階的に拡張することが可能で、施設の拡張性は円形加速器にはない直線加速器ILCの大きな特徴である。

2019年3月、文部科学省が「ILC計画に関心を持って国際的な意見交換を進める」政府見解を表明したことから、米・仏・独等の諸外国と費用分担や国際研究所のあり方等について議論が活発に行われるとともに、現地施設計画の具体化が進められており、ILCを日本に誘致する最終段階となっている。

ILCの総工費は7,400~8,000億円程度りとされており、建設の最有力候補地として岩手県北上山地が選定されている。ILC誘致に伴い国際研究所が新たに設立され、世界各地から研究者やその家族が滞在することから、周辺に国際都市が整備される大きな地域貢献を果たすものと期待されている。

ILCの高エネルギー物理実験では、電子と陽電子を高確率で衝突させるために、両ビームの広がり(数ナノメートル程度まで絞る)が必要であり、多数の加速装置の微小なズレや僅かな振動が影響を及ぼすことになるため、長距離に亘って強固で安定した地下岩盤が必要である。北上山地のILCを設置しようとする地区には、広範囲に良質な花崗岩が分布しており、地震や地殻変動の条件を考慮したうえで、そのような要求に極めて適していると判断されている。北上山地の地下に設置されたILCトンネルのイメージを図-3に示す。メイントンネルはなだらかな山地の地下、標高100mほどの位置に配置され、平坦地側からアクセスするトンネル(斜坑)が約4km間隔で複数箇所計画されている。

ILC地下トンネル内部には、図-4に示すように電子・陽電子を加速するための超電導加速空洞が内部に設置されているクライオモジュール冷却装置や、加速空洞に高周波を供給する電源装置など各種機器

が設置される。トンネルの中央には遮蔽壁が設けられ、電源装置を保護するために加速空洞で発生する放射線を遮蔽できる構造となっている。なお、加速実験中は人がトンネル内に立ち入ることはできない。

ILC 加速器の構成模式図を図-5 に示す。まず、電子・陽電子は、高エネルギーに加速する前に中央



図-3 北上山地の地下の ILC トンネルイメージ

のダンピングリングにおいてビームの性状が調整され、両端に輸送される。その後、電子・陽電子が加速器で最高エネルギーまで加速され、最終収束光学系において、ビームの広がり過ぎていた外側部分が削り落とされる。最終的に、中央の衝突点反応検出器内で電子と陽電子が衝突する。衝突せずに素通りした電子と陽電子は、衝突点の延長上にあるビームの捨て場であるビームダンプに送られる。このビームダンプの内部は水で満たされ、もっとも厳重な放射線管理が必要な部位となる。ILC 中央部には巨大な衝突実験空洞 (25m×40m×130m) が設置され、2種類の移動式大型検出器を用いて交互に実験を行い、測定信頼性を高める工夫がされている。

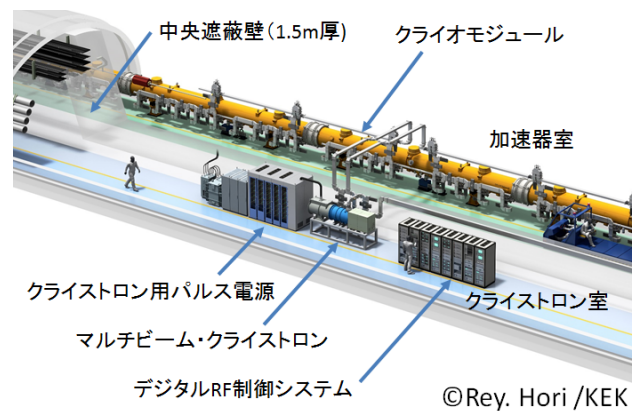


図-4 ILC 地下トンネル内部と各種装置の俯瞰図

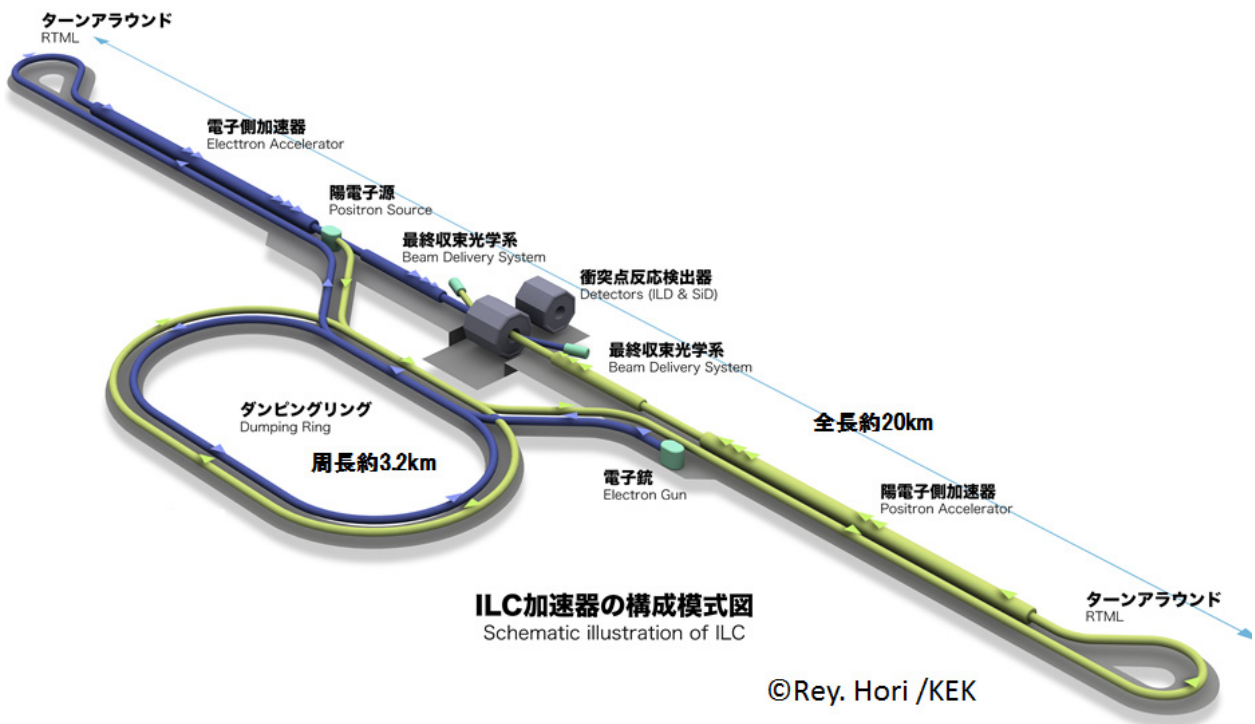


図-5 ILC 加速器の構成模式図

3. CERN の実験施設

ILC 施設の建設に関する技術提案に資する実験データの収集を目的として、スイスのジュネーブにある欧州加速器研究機構(CERN)の加速器施設において、2015年から2018年まで高エネルギー中性子を使った様々な遮蔽実験を行ってきた。

CERN は EU が共同で設立した国際機関であり、ジュネーブ近郊に位置し、研究所敷地も加速器施設もスイスとフランスをまたいで設置されている。図-6に示すように、CERN では世界最大の円形型加速器である LHC (Large Hadron Collider、大型ハドロン衝突型加速器) が稼働している。図中下方のジュネーブ空港と比較して分かるように巨大な施設であり、周回距離が 27km と、山手線程度の大きさを有している。これまで LHC では、ヒッグス粒子の発見を始め、物理学の発展に貢献する様々な成果が得られている。

CERN 研究所内には LHC 以外にも多くの加速器施設が存在する。本研究の遮蔽実験は、高エネルギー加速器混合場粒子場(CHARM, Cern High energy AcceleraTOR Mixed field facility)^{2),3)}で行なった。ここは、23 GeV のエネルギーに加速された陽子ビームを標的(Target)に当て、そこで発生する二次的な中性子、陽子およびパイ中間子の混合粒子場を生成させ、半導体素子等の試験サンプルに照射して半導体損傷やソフトウェアなどを研究する施設である。

CHARM 施設は、図-7に示すように、陽子ビームや標的の周囲が厚いコンクリートと鉄で遮蔽されている。標的は、直径 8 cm、厚さ 50 cm の円柱の銅またはアルミニウムの 2 種類が使用できるが、今回の遮蔽実験では銅を用いている。標的の中心位置でのビーム軸に対して垂直方向の断面を図-8に示す。標的の真上には厚さ 10 cm の大理石板、厚さ 80 cm の鉄遮蔽、厚さ 360 cm のコンクリート遮蔽が設置されている。



図-6 CERN の LHC 加速器とジュネーブ空港

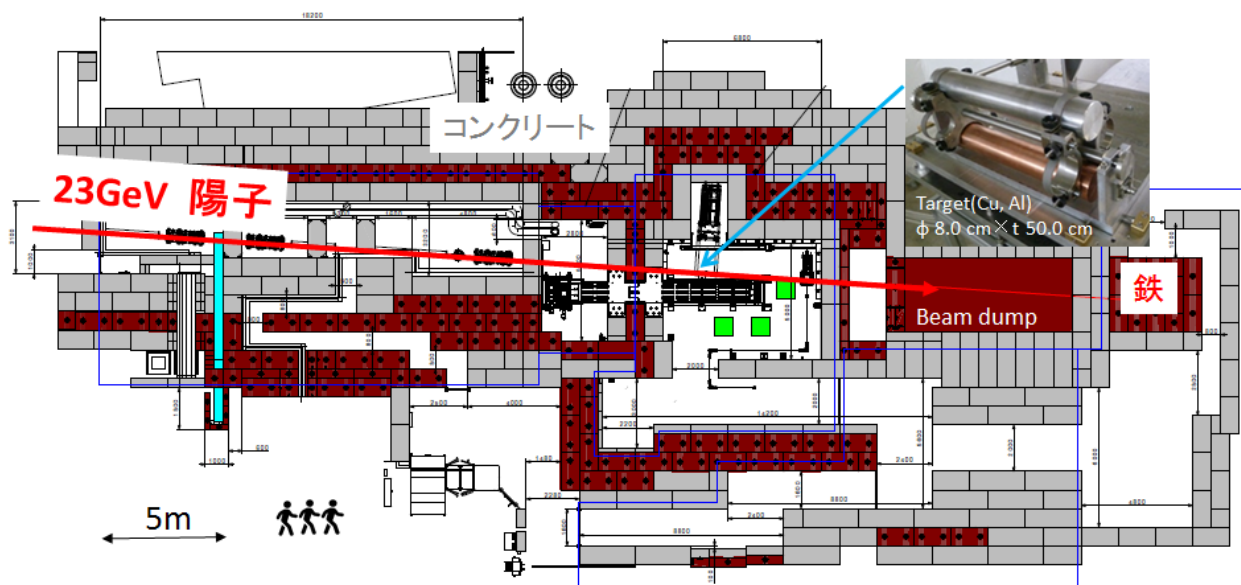


図-7 CHARM 施設の水平断面

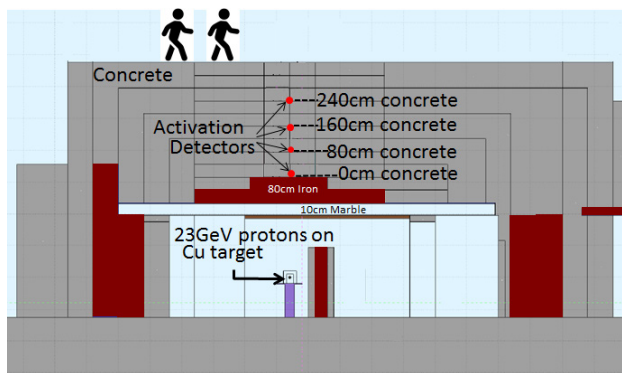


図-8 CHARM 施設の垂直断面と検出器設置位置

4. CHARM 遮蔽実験プロジェクト

高エネルギー中性子の測定において世界的に高度な技術を有する日本の実験チームに、CERN の CHARM 施設から中性子測定の依頼を受け、CERN の放射線防護グループの協力体制のもと、CHARM 実験プロジェクトが実現した。

ILC では電子ビームが用いられる一方、CERN の CHARM 施設では陽子ビームが用いられている。標的での中性子発生メカニズムは電子ビームと陽子ビームで異なるが、発生後の高エネルギー中性子の挙動に関しては基本的に同じである。そのため、ILC の環境に近い高エネルギー領域の中性子を発生する CHARM 施設での実験は、ILC の遮蔽設計高度化のためにも十分意義のあるものである。本実験プロジェクトでは、以下の実験を行ってきた。

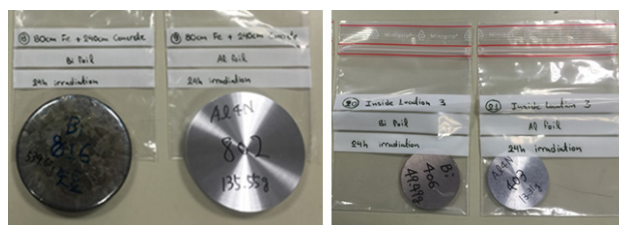
- ・放射化法による透過中性子の減衰分布測定^{4),5),6)}
- ・NE213 有機液体シンチレーション検出器による透過中性子エネルギースペクトル測定^{7),8),9)}
- ・標的室につながる迷路内の中性子分布測定¹⁰⁾
- ・標的室内の中性子分布測定¹¹⁾
- ・標的室内の空気の放射化測定

これらは、ILC における加速ビームラインやビームダンプで発生した中性子の、遮蔽壁における透過、トンネル内やそれに通じる通路（迷路）における拡散、ビームダンプ室内における空気の放射化に関して、放射線遮蔽解析の高度化に役立つ実験である。本報告では、当社が中心に行なった放射化法を用いた遮蔽透過中性子の減衰分布の測定に関して、以下に詳しく述べる。

5. 放射化法を用いた遮蔽実験

標的で生成した二次粒子のうち、中性子は電荷をもたないため透過力が大きく、減衰しながらも遮蔽

深くまで到達する。その中性子を測定するために、中性子との反応で放射性核種が生成（放射化）する物質であるビスマスとアルミニウムを放射化検出器として用いた。これらは高エネルギー中性子束分布を測定する目的として広く用いられている¹²⁾。図-9 に示すように、中性子強度に応じてビスマスおよびアルミニウムそれぞれ2つのサイズ（直径8cm、厚さ1cm および直径4cm、厚さ0.4cm）の円盤を用いた。これらを図-8 に示す通り、標的の真上のコンクリート遮蔽の厚さが0, 80, 160, 240cm の位置に設置した。図-10 に示すように、遮蔽上部のコンクリートブロックをクレーンで一時的に取り外して放射化検出器を設置したのち、ブロックを元に戻して照射実験を行なった。



直径8cm、厚さ1.0cm 直径4.0cm、厚さ0.4cm

図-9 ビスマス及びアルミニウム放射化検出器



図-10 CHARM 遮蔽上部における放射化検出器の設置に伴うコンクリートブロックの一時除去

遮蔽実験では、毎秒 $2 \sim 4 \times 10^{10}$ 個の陽子ビームを標的に当て、放射化検出器における放射性核種の生成量が十分な精度で測定できるように、一日から数日の照射を行なった。照射終了後は、再度コンクリート遮蔽ブロックをクレーンで吊り上げて放射化検出器を遮蔽内部より取り出し、生成した放射性核種からのガンマ線を高純度ゲルマニウム半導体検出器により測定した。ビスマス放射化検出器からのガンマ線を測定した際に得られたエネルギースペクトルの例を図-11 に示す。

天然のビスマスの存在度はすべて質量数が209の²⁰⁹Biである。この原子核に中性子が衝突して玉突きのように複数の中性子を放出する反応が起きた場合、質量数の違うビスマス同位体が生成する。例えば、

1つの中性子が衝突して8つの中性子を放出した場合、 $^{209}\text{Bi}(n,8n)^{202}\text{Bi}$ と表され、中性子が7つ減った質量数202のビスマス同位体となる。この ^{202}Bi は不安定な同位体、つまり放射性同位体であり、壊変した際に決まった確率で422keVのエネルギーのガンマ線を放出する。それを測定した結果が図-11の上部左端の図のピークであり、左右の平坦部を結んだ連続部分を引いた正味面積（Net area）が計数率となる。この計数率に対し、検出効率、ガンマ線放出率、半減期、陽子ビーム照射量を考慮して、 ^{202}Bi の生成率が算出される。このようにして、質量数が201, 202, 203, 204, 205, 206の6つのビスマス放射性核種に関して生成率を算出した。一方、アルミニウム放射化検出器では、 $^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$ 反応により生成した放射性核種の ^{24}Na に関して生成率を算出した。

6. 放射線遮蔽解析シミュレーション

放射線が物質中の原子と衝突した際には、散乱や吸収、粒子生成反応等が起き、さらにこれらの生成粒子が別の原子と衝突して新たな放射性核種が生成するなど、様々な現象が起きる。これらは物理法則に従い、それぞれに決まった確率に基づいて起こっ

ている。

このような現象を、確率論に基づいて放射線の挙動をひとつひとつ乱数で決定し、ひとつひとつの放射線を追跡して放射線の挙動を解析するシミュレーションの手法をモンテカルロ法と言う。意味のある結果を得るためには、きわめて多数の放射線を追跡し、統計精度を高める必要がある。近年、計算機の高速化に伴い、莫大な量の計算を高速に行なうことが可能となり、確率の低い反応の計算や、厚い遮蔽による数桁の放射線減衰などが、一昔前に比べて格段に精度良く算出できるようになった。

モンテカルロ法によって追跡する各現象の確率は、入射する粒子と衝突を受ける原子核の組み合わせや入射粒子のエネルギーによっても変化するため、そのデータベース（核データ）の量は莫大である。しかも、実験データが得にくい部分、もしくは実験データが得られない未知な部分も多い。それらの核データは理論計算で補われているが、その信頼性や精度もまた未知である。この信頼性と精度を直接的または間接的に向上させるのは実験データである。遮蔽実験により得られたデータは、多くの反応の積み重ねによる積分的な量ではあるが、間接的に核データを検証できる基礎実験データとして非常に有用である。

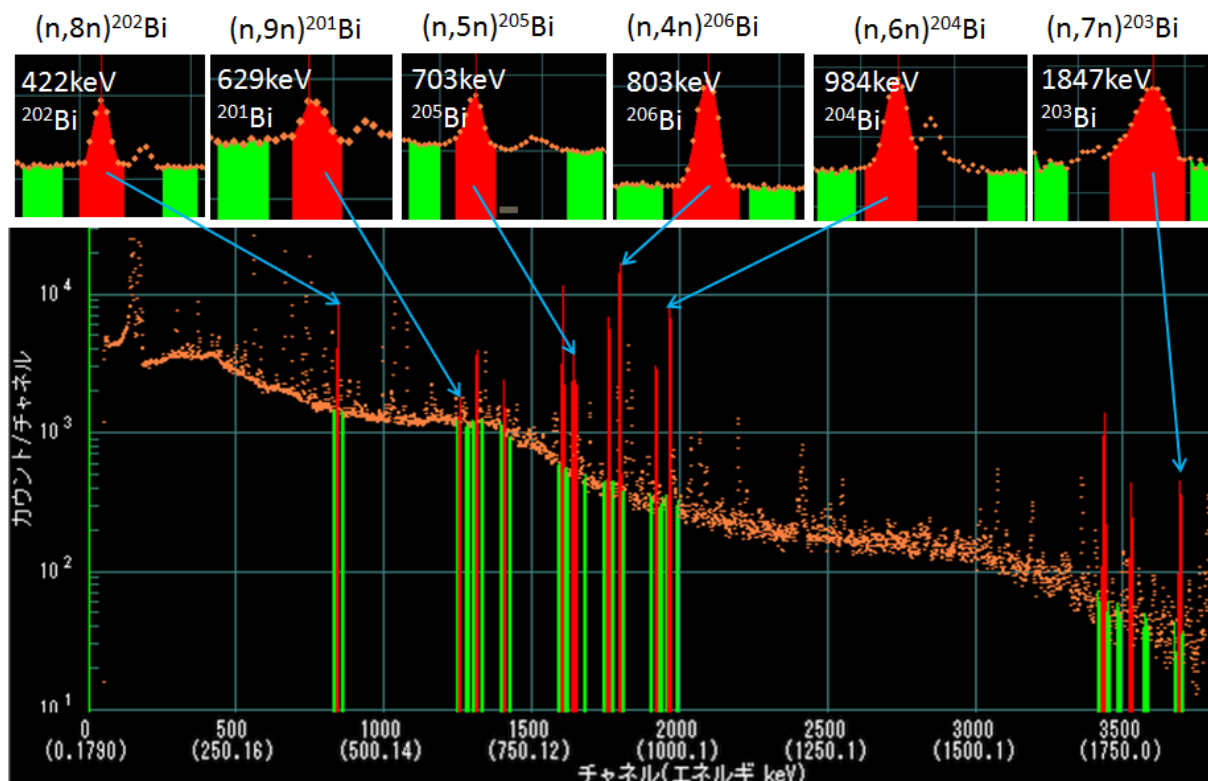


図-11 ゲルマニウム半導体検出器で測定したビスマス放射化検出器からのガンマ線エネルギースペクトル

ここでは、日本で開発され、粒子線治療施設の遮蔽設計などに幅広く使われているモンテカルロ計算コードである PHITS コード Ver-3.02¹³⁾を用いて、計算プログラムに内蔵されている核データや核モデルの精度検証を行う目的で、本研究で行なった遮蔽実験を模擬したモンテカルロシミュレーションを行なった。

まず、エネルギー23GeVの陽子ビームが直径8cm、厚さ50cmの銅標的に入射した際に生成する1MeV以上の中性子のエネルギースペクトルを9つの角度領域に分けて計算した。結果を図-12に示す。ここでは、統計精度を上げるために、区間内での差が大きく生じない程度の範囲で角度に幅を持たせている。生成中性子は前方性が強く、0-5°方向で最大エネルギー約20GeVの中性子が確認できる。遮蔽実験では、標的の真上方向つまり陽子ビーム軸に対して90°方向(側方)のコンクリート遮蔽内に放射化検出器を設置しているため、70-110°方向の結果を次のステップである遮蔽透過のシミュレーションにおける中性子線源として用いる。

図-13にCHARMの上部遮蔽を厚さのみ忠実に再現した簡易体系で行なったPHITS計算における二次元中性子分布を示す。大理石板(Marble)中央に90°方向中性子束を入射し、鉄80cm厚、コンクリート800cm厚の内部における中性子エネルギースペクトルを計算した。ここで、CHARM施設のコンクリートは厚さ360cmであるが、実際より厚い深さまで観察するため計算は800cmで行なった。図-13の色分布は中性子束の強度を示しているが、入射した中性子が厚い鉄およびコンクリートを透過することで数桁も減衰していくことが分かる。

図-13に示した遮蔽内の各厚さの面を横切る中性子を全てスコア(蓄積)し、厚さ毎の中性子束エネルギースペクトルを算出した。結果を図-14に示す。青、赤および黒のプロットは、それぞれ入射位置である大理石板、鉄遮蔽内およびコンクリート遮蔽内での中性子束スペクトルを示している。コンクリート遮蔽内に入ってから、厚さが増してもスペクトルの形状がほとんど変化しない、いわゆるスペクトル平衡が起きている。これは、低エネルギー中性子の減衰が高エネルギー中性子の減衰より速いが、高エネルギー成分の散乱によるエネルギー減少で形成される成分が低エネルギー中性子成分を支配的に形成しているために生じると考えられている。

放射化検出器として用いたビスマスとアルミニウムで生じる放射化反応の断面積¹⁴⁾を図-15に示す。ここで断面積とは原子1個当たりの中性子束に

対する反応確率である。単位であるbarn(バーン)は 10^{-24}cm^2 と面積の次元を持つため断面積と呼ばれる。図-15に示すように、ビスマスは多くの反応チャンネルを持っており、それらがおよそ10MeV間隔で閾値および断面積ピークを有していることから、その生成率を測定することで入射中性子束のエネルギー分布を観察することが可能である。

図-14に示した中性子束エネルギースペクトルと図-15に示した放射化断面積の積を積分することで、各反応率を算出することができ、モンテカルロシミュレーション計算の結果を基にした放射性核種生成率の計算値を算出した。

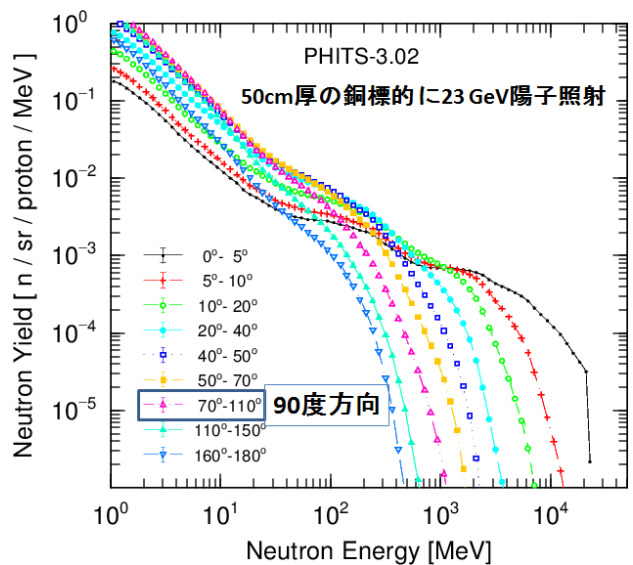


図-12 PHITS計算による銅標的への陽子入射時の生成中性子エネルギースペクトル角度分布

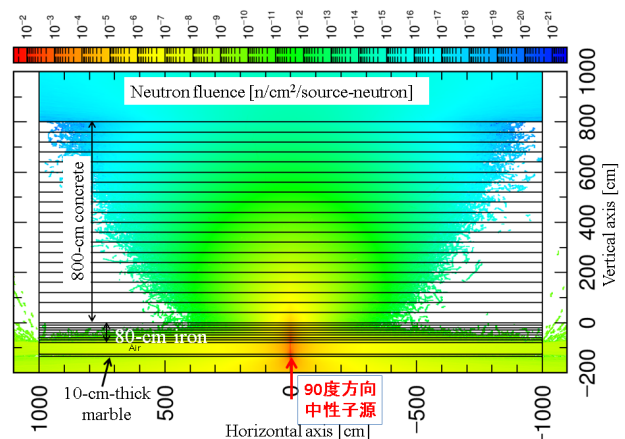


図-13 PHITS計算による90°方向中性子源入射コンクリート遮蔽透過計算の二次元中性子分布

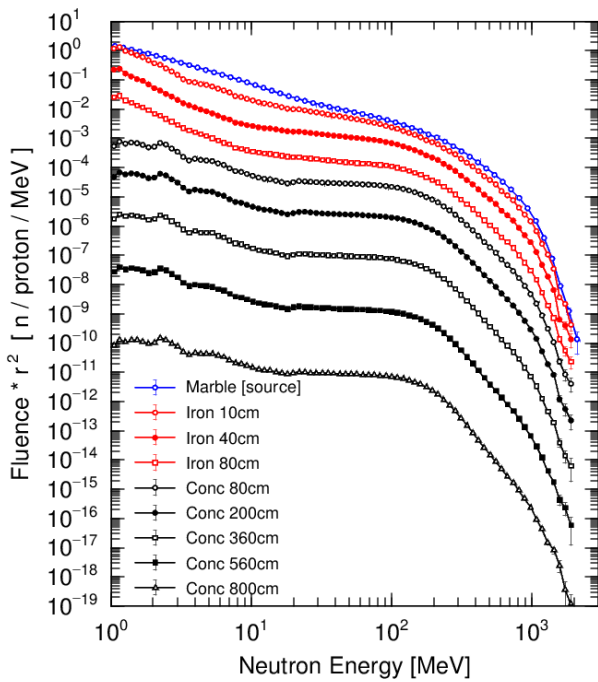


図-14 PHITS計算による各遮蔽厚における中性子束エネルギースペクトル分布

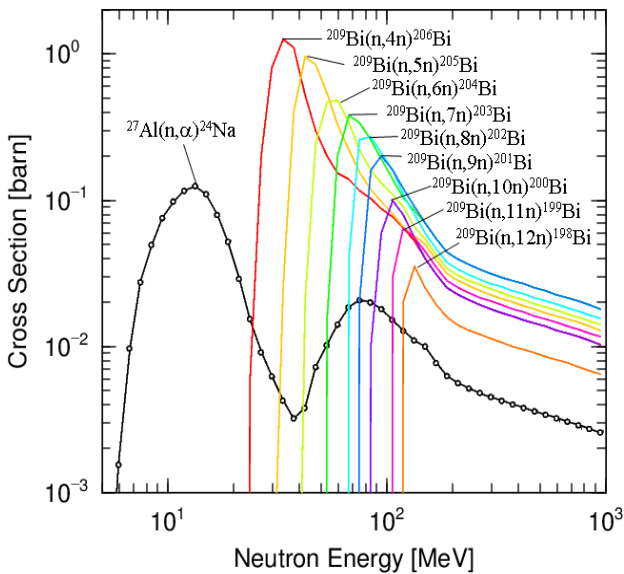


図-15 ビスマスとアルミニウムの放射化断面積¹⁴⁾

7. 結果と考察

図-16 に放射性核種生成率をコンクリート厚さによる減衰分布として表示し、実験値とモンテカルロシミュレーションから算出した計算値の比較を行った。横軸はコンクリート厚さ、縦軸は核種生成率を対数で示している。片対数表示でほぼ直線的に減衰していることから、生成率は指数関数的に減衰

していることが観察できる。アルミニウムから生成する²⁴Naおよびビスマスから生成する²⁰⁶Biの生成率に関しては、実験値と計算値が非常に良い一致を示していることが分かる。一方、中性子の放出の多い反応である²⁰⁹Bi(n,9n)反応による²⁰¹Biの生成率は、計算値が2倍程度の過大評価であることが分かる。

図-16 を基にして実験値に対する計算値の比(C/E)を算出し、放射化断面積のピークエネルギーを横軸にしてプロットしたものを図-17 に示す。C/Eの値から、断面積のピークが20~40MeV付近では計算値がおよそ20%程度で一致していることが言える。また、断面積のピークエネルギーが上昇するにつれ、計算値が過大評価していく傾向にあり、80~90MeV付近で最大およそ2倍程度の過大評価が見られた。この原因は、PHITSコードの核モデル、使用した核データ、放射化断面積データのいずれかに起因すると考えられるが、詳細な調査は、今後の課題である。

しかし、全般的に本研究の計算手法では、実験値と概ね2倍以内の一致が得られたと言える。

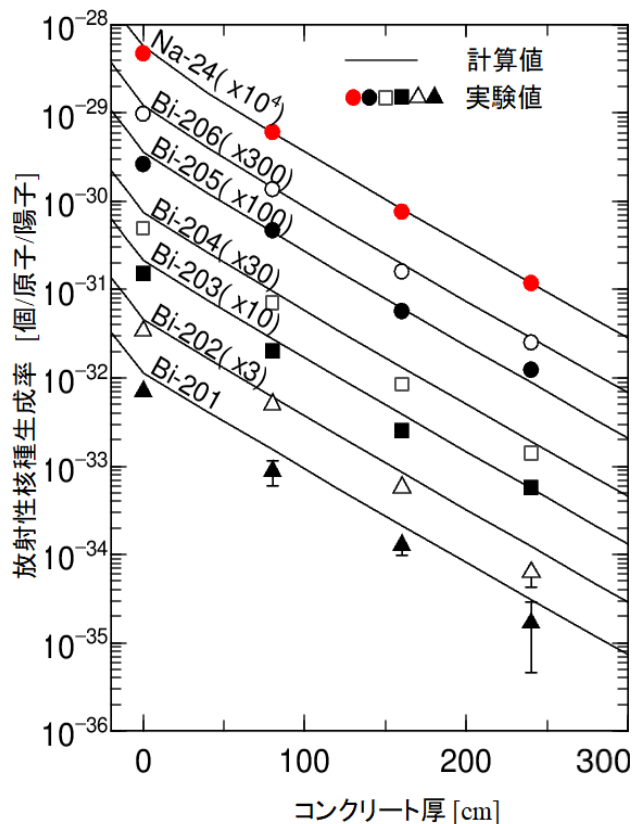


図-16 放射核種生成率のコンクリート厚による減衰分布

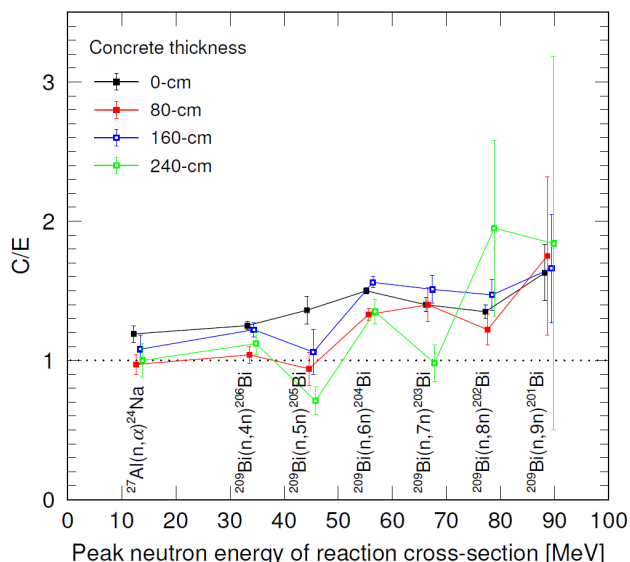


図-17 核種生成率実験値に対する計算値の比 (C/E)の、断面積ピークエネルギーに関する分布

8. まとめ

ILC 計画は欧・米・アジアが推進する国際プロジェクトであり、日本政府が誘致に関心を表明したことで、今後、計画は実現に向け急速に進んでいくことが期待される。施設建設の候補地として岩手県の北上山地が最有力視されており、全長約 20 km の地下トンネル、衝突実験装置、国際研究所の立地等の総工費は 7,400~8,000 億円と見込まれる。この国際プロジェクトに対し、我が国の建設業界が大きく貢献できる絶好の機会でもある。

ILC 施設は、これまでに例のない高エネルギーの電子・陽電子直線衝突実験施設である。電子加速器は陽子加速器に比べれば放射線の影響はかなり小さいものの、より安全な放射線対策を考えるうえでは、いまだに研究開発の余地がある。放射線安全を考えるうえでは、中性子線の遮蔽問題が最重要課題である。今回、CERN の CHARM 施設において 23GeV 陽子ビームから発生する高エネルギー中性子の遮蔽実験を行ない、モンテカルロシミュレーションによる解析結果が実験値を 2 倍以内で再現できることが確認できた。更に信頼性と精度を向上させるためにデータベースの見直しを行うと共に、その他の不足している実験データを取得することが重要である。

CERN における本実験は、ILC の加速ビームラインやビームダンプで発生した中性子の、遮蔽壁における透過、トンネル内における拡散、ビームダンプ

室内の空気の放射化に関して、放射線遮蔽解析の高度化に役立つものである。今後は、高エネルギー電子ビームを用いた実験によって ILC のビームラインやビームダンプからの生成放射線や生成放射能の評価の精度向上を図り、より安全で精度の高い遮蔽設計を目指すことで施設建設に貢献していきたい。

謝辞

ILC 計画を説明するにあたり、高エネルギー加速器研究機構(KEK)から画像(図-3、図-4、図-5)の提供を頂いた。深く感謝いたします。

CERN の遮蔽実験においては、CERN Radiation Protection(RP)グループの Robert Froeschl 博士、Elpida Iliopoulou 博士課程大学院生、Stefan Roesler 博士、Nikolas Riggaz 博士、CERN CHARM グループの Markus Brugger 博士、Angelo Infantino 博士ら多くのスタッフと共同で行ない、CHARM 施設での照射実験、ガンマ線スペクトル測定室でのゲルマニウム半導体検出器による測定等、CERN 全般での多くの業務、作業を行なって頂いた。ここに深く感謝いたします。

また、CERN 実験及び解析を行なうにあたり、日本のメンバーとして、高エネルギー加速器研究機構の佐波俊哉教授、萩原雅之准教授、大山隆弘技師、長畔誠司技師、広島大学の梶本剛助教、九州大学の執行信寛助教、李恩智博士課程大学院生、京都大学の八島浩助教、産業技術総合研究所の松本哲郎主任研究員、増田明彦主任研究員らと共同で行ない、多くのご協力を得た。ここに深く感謝いたします。

当社における本研究は、技術研究所の研究 B テーマ KN315157「高エネルギー粒子加速器における放射線遮蔽の研究」で行なわれたものである。

<参考文献>

- 1) “国際リニアコライダー(ILC)に関する有識者会議、ILC 計画の見直しを受けたこれまでの議論のまとめ”、平成 30 年 7 月 4 日、文部科学省 HP.
- 2) R. Froeschl, “Radiation protection assessment of the proton irradiation facility and the CHARM facility in the east area”, Tech. Rep. CERN-RP-2014-008-REPORTS-TN, EDMS 1355933 (2014).
- 3) R. Froeschl, M. Brugger and S. Roesler, “The CERN high energy accelerator mixed field (CHARM) facility in the CERN PS east experimental area”, In: Proceedings of SATIF12, NEA/NSC/R(2015)3, Batavia, Illinois, United States, pp. 14-25 (2014).

- 4) 中尾徳晶, 佐波俊哉, 梶本剛, Froeschl Robert, Brugger Markus, Roesler Stefan, Iliopoulou Elpida, Infantino Angelo : “CERN/CHARM における 24GeV 陽子を用いた遮蔽実験 (9)放射化法によるコンクリート中の中性子減弱距離測定とシミュレーション”, 日本原子力学会 2019 年秋の大会要旨集, 1N06.
- 5) N. Nakao, T. Sanami, T. Kajimoto, E. Iliopoulou, R. Froeschl, M. Brugger, S. Roesler and A Infantino, “Attenuation length of high energy neutrons through a thick concrete shield measured by activation detectors at CHARM”, *J. Nucl. Sci. Technol.* (投稿中) .
- 6) E. Iliopoulou, P. Bamidis, M. Brugger, R. Froeschl, A. Infantino, T. Kajimoto, N. Nakao, S. Roesler, T. Sanami and A. Siountas “Measurements and FLUKA simulations of bismuth and aluminium activation at the CERN Shielding Benchmark Facility (CSBF)”, *Nucl. Instr. Meth.* A855 (2018) pp. 79-85.
- 7) Eunji Lee, “Study on Neutron Attenuation in Concrete and Steel for Shielding Design of High Energy Hadron Accelerator”, Ph.D. Thesis, Kyushu Univ. (2019).
- 8) T. Kajimoto, T. Sanami, N. Nakao, R. Froeschl, S. Roesler, E. Iliopoulou, A. Infantino, M. Brugger, K. Tanaka and S. Endo, “Reproduction of neutron fluence by unfolding method with an NE213 scintillator”, *Nucl. Instr. Meth.* A906 (2018) pp. 141-149.
- 9) T. Kajimoto, T. Sanami, N. Nakao, R. Froeschl, S. Roesler, E. Iliopoulou, A. Infantino, M. Brugger, E. Lee, N. Shigyo, M. Hagiwara, H. Yashima, H. Yamazaki, K. Tanaka and S. Endo, “Neutron energy spectrum measurement using an NE213 scintillator at CHARM”, *Nucl. Instr. Meth.* B429 (2018) pp. 27-33.
- 10) 梶本剛, 佐波俊哉, 中尾徳晶, 李恩智, 八島浩, 松本哲郎, 増田明彦, 大山隆弘, 長畔誠司, 上養義朋, 田中憲一, 遠藤暁, Froeschl Robert, Iliopoulou Elpida, Infantino Angelo, Roesler Stefan : “CERN/CHARM における 24GeV 陽子を用いた遮蔽実験 (10) 有機液体シンチレータを用いた迷路中の中性子エネルギースペクトルの測定”, 日本原子力学会 2019 年秋の大会要旨集, 1N07.
- 11) T. Oyama, M. Hagiwara, T. Sanami, H. Yashima, N. Nakao, E. J. Lee, E. Iliopoulou, R. Froeschl, A. Infantino and S. Roesler, “Measurement and calculation of thermal neutrons induced by the 24 GeV/c proton bombardment of a thick copper target”, *Nucl. Instr. Meth.* B434 (2018) pp. 29-36.
- 12) N. Nakao, Y. Uwamino and K. Tanaka, “Measurement of the neutron angular distribution from a beryllium target bombarded with a 345-MeV/u ²³⁸U beam at the RIKEN RI beam factory”, *Nucl. Instr. Meth.* B423 (2018) pp. 27-36.
- 13) Tatsuhiko Sato, Yosuke Iwamoto, Shintaro Hashimoto, Tatsuhiko Ogawa, Takuya Furuta, Shin-ichiro Abe, Takeshi Kai, Pi-En Tsai, Norihiro Matsuda, Hiroshi Iwase, Nobuhiro Shigyo, Lembit Sihver and Koji Niita, “Features of Particle and Heavy Ion Transport code System (PHITS) version 3.02”, *J. Nucl. Sci. Technol.* 55, pp. 684-690 (2018).
- 14) F. Maekawa, U. von Mollendorff, P. P. H. Wilson, M. Wada and Y. Ikeda, “Production of a dosimetry cross section set up to 50 MeV”, Proc. 10th International Symposium on Reactor Dosimetry, Sep. 12–17, 1999, Osaka, Japan, American Society for Testing and Materials, p. 417 (2001).