

氏名	たにぐち しんご 谷口 真吾
授与学位	博士(工学)
学位授与年月日	平成15年3月24日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科、専攻の名称	東北大学大学院工学研究科(博士課程)量子エネルギー工学専攻
学位論文の題目	高エネルギー電子加速器及び電子貯蔵施設における放射線環境の計測に関する研究
指導教官	東北大学教授 中村 尚司
論文審査員	主査 東北大学教授 中村 尚司 東北大学教授 石井 慶造 東北大学教授 馬場 護

論文内容要旨

加速器を建設する際には人体や機器、環境の保護のために計算による放射線の評価が必要である。また、建設されてからも同様の目的で施設、施設周辺の放射線の測定による評価が必要である。放射線防護の観点から加速器は大きく電子加速器と陽子(陽子より重い荷電粒子を含む)加速器に分けられる。近年、加速器に関連する技術は飛躍的に進歩しており研究目的の加速器は高エネルギー化、大強度化している。これらの加速器の進歩に伴ない放射線の評価すべき範囲も広がっている。一つは高エネルギー化への対応である。現在、加速器は素粒子物理のために加速エネルギー数 100 GeV クラスの高エネルギー電子加速器が日米欧でそれぞれ計画されている。一方で、高エネルギー電子加速器の遮蔽設計のためのデータは不足している。もう一つは大強度化である。大強度化は電子加速器と電子貯蔵リング放射光ビームラインからなる放射光施設において顕著である。現在、最先端の放射光施設は第3世代大型放射光施設と呼ばれており第3世代大型放射光施設はすでに日米欧それぞれで稼働している。大強度化により加速器の構造材や放射線検出器を含む各種センサーはかつて無い極端に強い放射光の照射下にさらされている。とくに放射線検出器においては飽和現象により正常に作動しないという問題が起きている。大強度放射線の照射下での放射線損傷および放射線検出器の特性の評価には放射線の標準照射が必要であり、そのためには照射する放射線の強度を正確にモニタするシステムが必要である。これらの理由から 100 keV 以下の低エネルギー光子に対して大強度まで飽和せずに正常に動作する強度モニタが求められている。

本論文はこのような現状を鑑みて、現在必要とされているにも拘らず情報が欠けている次の2つのテーマを取り上げて研究を行なったものである。1つは高エネルギー電子加速器施設から生成された光中性子の遮蔽体深層透過の実験であり、1つは SPring-8 (Super Photon ring 8 GeV) をはじめとする最新の大強度放射光施設が必要としている放射光の絶対強度モニタの開発である。前者の実験は米国スタンフォード大学のスタンフォード線型加速器センター (Stanford Linear Accelerator Center, SLAC) において現在不足している高エネルギー電子から生成される中性子のコンクリート遮蔽体透過のデータを収集した。後者では2つの大強度放射光の強度モニタ測定器を提案し、大型放射光施設 SPring-8 と高エネルギー加

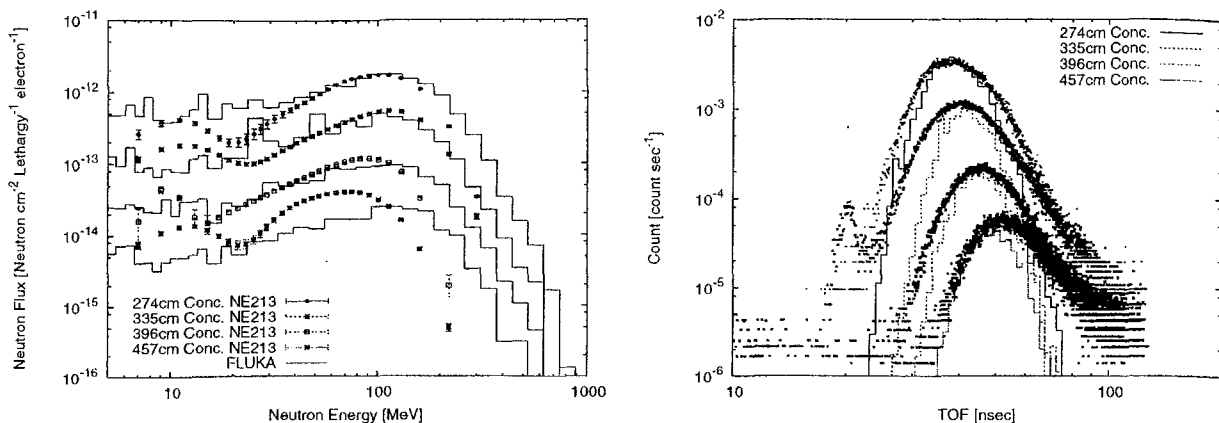


図 1: 高エネルギー電子加速器施設における遮蔽体透過後の中性子エネルギースペクトル(左)と中性子 TOF スペクトル(右)、どちらの図においても計算値は実線で測定値は点で表わされている

速器研究機構フォトンファクトリー (KEK-PF) において、放射光強度に対する直線性を中心とした、放射光に対する特性の評価を行なった。

第 2 章では、高エネルギー電子加速器施設において中性子の遮蔽体透過データを取得した。実験は、米国スタンフォード線型加速器センター (SLAC) の高エネルギー線型電子加速器の FFTB(Final Focus Test Beam) ビームダンプにて行なった。28.7 GeV 電子がアルミ製のビームダンプに入射した際に生成する中性子のコンクリート遮蔽体透過中性子のエネルギースペクトル、ターゲットに電子が入射してから検出器で検出されるまでの時間である中性子 TOF (Time-Of-Flight) スペクトルを有機液体シンチレータ NE213 で測定した。低エネルギーの中性子の測定は多球形減速材付中性子検出器 (Bonner ball 検出器) を用いて測定した。コンクリート遮蔽体の厚さを変えた測定を行ない中性子束と中性子線量の減弱の評価も行なった。また実験を模擬した計算をモンテカルロコード FLUKA で行ない、実験値と比較した。中性子エネルギースペクトルおよび TOF スペクトルの NE213 による測定結果と FLUKA による遮蔽体透過後の計算結果を図 1 に示す。実験値と計算値の比較はエネルギースペクトル、TOF スペクトルそれぞれ良い一致を示している。しきいエネルギー以上の中性子束、中性子線量の減弱距離の評価においては実験値の方が計算値より 10% ほど大きな値となった。

第 3 章では、最初に電子貯蔵施設における放射光の発生について説明し、次に従来から用いられてきた放射光強度モニタである自由空気電離箱と Si PIN フォトダイオードの第 3 世代放射光施設の放射光強度下の飽和特性の評価を行なった。その結果、自由空気電離箱は飽和現象により Si PIN フォトダイオードには測定許容電流に制限があり、それぞれに精度よく測定できる光子束強度が 1×10^{12} および 1×10^{13} [photon sec⁻¹] あたりに上限があることが分り、第 3 世代放射光施設の光子強度が自由空気電離箱と Si PIN フォトダイオードの測定限界を越えていることが示された。

そこで第 4 章では、放射光を大強度まで飽和せずにモニタできる検出器の開発を目指して、2 次電子チェンバーとガスシンチレーション検出器を作成し、これら 2 つの検出器の大強度放射光の強度に対する線型性の測定を行なった。作成した検出器の概観を図 2 に示す。2 次電子チェンバーは放射光によって

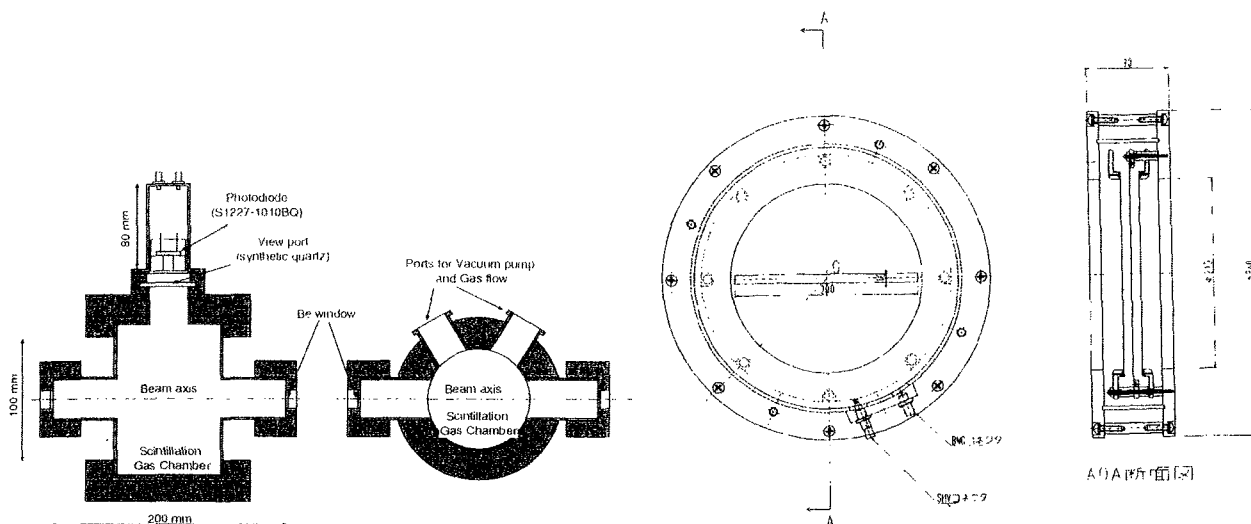


図 2: 本論文で作成し応答の評価を行なった放射光強度モニタの概観、ガスシンチレーション検出器 (左) と 2 次電子チェンバー (左)

薄膜で発生した数 eV から数 10 eV の 2 次電子の量を測定することにより、放射光の強度を測定するものであり、ガスシンチレーション検出器は放射光によりガスで発生したシンチレーション光の量を測定することにより、放射光の強度を測定するものである。2 つの検出器からの出力には現在大型放射光施設 SPring-8 で実現している単色光、準単色光の最大強度である約 10^{15} [photon sec⁻¹] まで飽和現象は見られなかった。

本論文によって得られた高エネルギー電子加速器の中性子遮蔽のデータは前例のないデータであり今後世界で計画されている高エネルギー電子加速器建設の際の遮蔽設計の精度向上に寄与できると期待できる。TOF スペクトルによるシミュレーション計算の精度評価は新たな評価手法の開発である。また、本論文で飽和現象の特性を評価した 2 次電子チェンバーとガスシンチレーション検出器は、現在の放射光の強度では飽和現象は見られなかった。定精度、再現性等の面で改善が必要ではあるが、強度モニタとして最も重要な特性の 1 つである入射光子強度に対する直線性を確認したことの意義は大きく、今後のこれら 2 つの検出器を用いた放射光の強度モニタの開発に本論文の成果が寄与すると期待できる。

論文審査結果の要旨

近年、加速器に関連する技術の進展により加速器から生成される 2 次粒子の高エネルギー化、大強度化は著しく、それに対応する放射線環境の測定評価が重要になっている。特に高エネルギー電子加速器の遮蔽評価のためのデータは非常に乏しい。また、電子加速器に付設される電子貯蔵施設リングの電子ビームの大強度化により、発生する放射光の大強度化が顕著であり、従来から用いられている放射光強度モニタ検出器では正確にその強度をモニタすることが困難になっている。本論文は、高エネルギー電子加速器施設において、遮蔽データの測定および電子貯蔵施設の放射光ビームラインにおいて、大強度放射光フルエンスモニタの開発を行ったものであり、全編 5 章よりなる。

第 1 章は序論である。

第 2 章では、米国の高エネルギー電子加速器施設 SLAC において 28.7 GeV の電子ビームのビームダンプを用いて、厚いコンクリート遮蔽体透過後の中性子のエネルギースペクトル、中性子束の減弱、中性子線量の減弱の測定がなされており、その結果をモンテカルロ計算値と比較検討している。遮蔽体透過後の中性子飛行時間データの実験値を計算と比較しており、これは本論文によって開発された全く新しい計算の精度検証の方法である。

第 3 章では、電子ビームからの放射光の発生機構の説明に続いて、従来から放射光の強度モニタ検出器として用いられてきた、自由空気電離箱と Si PIN フォトダイオードの大強度放射光に対する特性を測定評価している。その結果、自由空気電離箱と Si PIN フォトダイオードでモニタできる放射光の強度は $1 \times 10^{12} \sim 1 \times 10^{13}$ (光子/秒) に上限があることを明らかにしている。

第 4 章では、2 次電子チェンバーとガスシンチレーション検出器を製作し、新たな放射光強度モニタ検出器としての応用を試みており、これら検出器の測定原理、特性測定結果について詳述している。これら 2 つの検出器の放射光強度に対する出力の直線性は、現在の大型放射光施設 SPring-8 において実現されている単色光、準単色光の最大強度である約 1×10^{15} (光子/秒) 以上の領域まで保証されていることを検証している。

第 5 章は総括である。

以上要するに、本論文は、高エネルギー電子加速器の遮蔽設計上極めて重要な、中性子エネルギースペクトルと減弱距離を始めて測定により明らかにし、かつ大強度放射光による標準照射を実現するために必要な大強度放射光のフルエンスモニタの開発を行ったものであり、放射線工学、加速器工学の発展に寄与するところが大きい。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。