

一般論文

関連するSDGs



ハイブリッドシールド型 電子線照射装置の開発

Development of Hybrid Shield-Type EPS

林 泰隆
Hayashi Hirotaka

梅村 純平
Umemura Junpei

概要

放射線架橋処理した被覆電線は、特に自動車産業で広く使用されてきた。近年、ハイブリッド車や電気自動車の普及に伴い高電圧・大電流に対応する径の大きな電線が必要になり、その放射線架橋処理用に高加速電圧の電子線照射装置（EPS:Electron beam Processing System）が求められている。高加速電圧のEPSにはコンクリートシールドが必要であるが、近年の建築資材不足や建築費用の高騰から小型化が喫緊の課題となっている。

従来の遮蔽設計手法では、詳細な遮蔽性能の評価に時間がかかり、精度も低いことからより安全を考慮した評価となり、遮蔽設備が大型化する傾向にあった。今回、放射線遮蔽シミュレーション解析を用いて使用コンクリート量を低減する設計に取り組んだ。線源付近から10桁以上線量が低下する低線量域の算出手法を改善することにより、高い計算速度と精度を持ち、設計サイクルを高速化する手法を確立した。この手法を用いて新しいEPS設備の構造（ハイブリッドシールド型EPS）を開発した。

本論文では、ハイブリッドシールド型EPSの構造および実測結果を併せて報告し、今後の展望を紹介する。

Synopsis

Radiation cross-linked coated wires have been widely used, particularly in the automotive industry. With the recent proliferation of hybrid and electric vehicles, the need for high voltage and large currents has led to an increase in the diameter of electrical wires, which has necessitated higher acceleration voltages for electron beam processing systems (EPS). Additionally, due to recent shortages of construction materials and rising costs, miniaturization of the concrete shielding rooms required for high-acceleration-voltage EPS has become an urgent issue.

In conventional design methods, detailed evaluation of shielding performance took a considerable amount of time and lacked accuracy, which resulted in oversized components for safety. To address this, we undertook a design aimed at reducing the amount of concrete used by performing radiation shielding simulation analysis. We improved the methods for calculating very low dose rates that decrease by more than 10 orders of magnitude as distance increases from near the radiation source, enhancing both computation speed and accuracy. Thus, we established this method for accelerating the design cycle, and using this approach, we developed a new structure for a hybrid shield-type EPS.

This paper reports on the design methods, presents the structure of the hybrid shield-type EPS and actual measurement results, and gives an overview of future prospects.

キーワード：電子線照射装置、EGS5、PHITS、放射線遮蔽シミュレーション

1. はじめに

ポリエチレンの放射線架橋は、1952年にチャールズ・ビーによって発見されて以来、さまざまな産業で応用されるようになった。日本国内では、電子線照射装置（EPS:Electron beam Processing System）を使用したポリエチレン被覆電線の生産が1961年から開始され、耐熱性を必要とする自動車のエンジン周辺などに広く使用されてきた。近年では、ハイブリッド車や電気自動車の普及が加速し、これらの車両内で使用されるモーターや蓄電池向けの電線は高電圧・大電流に対応すべく太径化が進んでおり、それに伴い電線被覆の直径や厚みも大きくなっている。このような電線被覆に電子線を透過させるためには加速電圧が1000kV以上のEPSが必要であり、その需要が増加している。

EPSは放射線発生装置の一種であり、加速された電子線で放射線架橋を行う際に高い透過力を持つX線が副次的に発生するため、安全性を担保する遮蔽設備が必要となる。X線の透過力は加速電圧が高くなるほど大きくなるため、加速電圧が高い装置にはより厚い遮蔽材が必要となり、遮蔽設備のサイズやコストの増加に繋がる。

一般的に、EPSの加速電圧に応じて次のような遮蔽設備が使われている。

- 加速電圧300～1000kV：自己シールドと呼ばれ、鉛や鉄材などの遮蔽部品を組み合わせた装置と一体化した設備。
- 加速電圧1000kV以上：コンクリートシールドと呼ばれ、EPS周辺をコンクリートの建築物で覆った設備。

自己シールドは、高密度の遮蔽材を使用することでコンパクトな設計が可能であり、設備の解体や組立も容易である。しかし、加速電圧1000kV以上ではより厚い遮蔽が必要になるため、組立性やコスト面で課題が生じる。一方、コンクリートシールドは、安価なコンクリート材料を使ったシンプルな構造設計が可能であるが、コンクリートの密度は鉛や鉄材に比べて低いため、設備のサイズが大きくなる。

既存製品のコンクリートシールドは2階建の構造物で（図1）、1階が電子線照射部（X線発生源）、2階がEPS本体の配置部となっている。1階で発生したX線は2階にも影響するため、2階周辺にもコンクリート壁で遮蔽を施す必要がある。前述のように、加速電圧の高いEPSの導入にはコンクリートシールドが必要となるが、近年の建築費用の高騰に伴いコンクリートシールドのコンパクト化と設備費用の低減が喫緊の課題となっていた。

本論文では、加速電圧が2000kVのEPSを対象とした放射線遮蔽シミュレーション解析と、それに基づく

EPS本体と遮蔽構造の設計改良、および2階のコンクリートシールドを省略するハイブリッドシールド遮蔽の取組みについて紹介する。

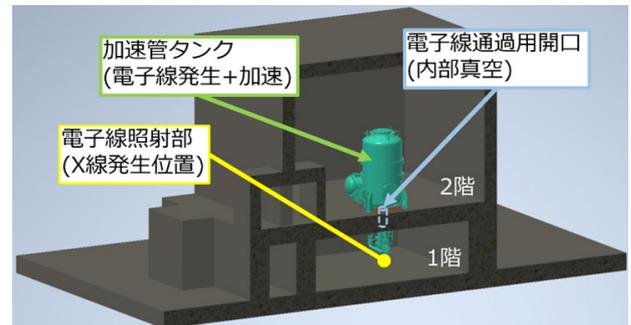


図1 既存製品のコンクリートシールド型構造図

2. 従来のX線遮蔽計算手法での限界

まず、コンクリートシールド構造の削減可能部分を明らかにするため、遮蔽設計の考え方について簡単に述べる。

遮蔽設計では、人が立ち入る場所の線量値を安全レベル（法令基準値以下）まで減衰させるような遮蔽材とその厚みを決定する。しかし、実環境では計算の精度に影響する要素がいくつも存在するため、より安全を考慮した数値を設定する必要がある。例えば、位置方向が計算で確定できていればその方向のみを厚くすればよいが、位置方向が確定できない（全方向の線量値が高い可能性がある）場合は、全体を厚い遮蔽材で囲うことになる。この考え方は計算手法によらず同じである。

コンクリートシールド構造の全ての部分において計算精度を上げることにより材料の削減が可能であれば、単純に使用量の多い部分や、計算が複雑になる部分が削減候補になる。コンクリートシールド型EPSの削減候補としてまず挙げられたのは2階部分であった。2階部分は、クレーンを使ってタンク類を組立設置するため、クレーン設備やクレーン作業が可能な高さが必要となる。そのため、壁厚が1階よりも薄いことを考慮しても、1階と同等の壁量が2階にも存在する（図1）。

2階へのX線の主経路は、1階の電子線照射部（X線発生地点）直上の電子線通過用開口のみであるため、発生地点からの直接線はこの開口を通った上向きなのが主となる。この上向き直接線が周辺の各材料や空気と相互作用することによりあらゆる方向への散乱線が発生するため、これを精度よく計算できない場合は2階全体を囲うような遮蔽が必要となる。逆に、散乱線を精度よく計算できるならば、遮蔽材は特定箇所（人が立ち入る範囲へ影響するもの）のみを厚くすれば十分であるといえる。例えば、2階部分を全周コンクリート壁で囲う必要はなく、タンク内や表面のみに鉄板や

鉛板で処置を施すことで安全性の確保が可能になる。

そのようなX線遮蔽設計には、2階に配置するタンク自身、内外部材、工場天井、周辺空気等によってさまざまな方向に向かう散乱線の量を、高精度、かつ設計時間過剰とならぬよう高速に算出する必要がある。しかし、当社の従来の遮蔽設計手法は簡易手法と詳細手法の2種であり（表1）、どちらも古くに策定されたもので、近年の計算機の進歩に対するリバランスはできていなかった。

表1 X線遮蔽設計手法毎の特徴（当社従来手法）

計算手法	利点	欠点
簡易手法	誰でも安全な遮蔽が設計できる	構造によらず評価が一律
詳細手法 (アルベド方式)	精度よい計算ができる	複雑構造の評価時間が指数関数的、実質評価不可

簡易手法は、過去の実測データや経験則に依存するもので1970年代に策定された。この手法は、直接線が遮蔽体を透過する際の放射線減弱については実体に近い計算が可能であるが、散乱線については方向性や前後経路の広い狭いによる強弱等が一切考慮されておらず、どのような複雑な形状でも一律評価であることから、精度のよい計算ができない。適用すべきでない構造を避けさえすれば誰でも安全な設計ができる手法であるが、散乱線を一律評価するため、散乱線量の計算精度が必要な2階部分の遮蔽削減設計には適用不可である。

詳細手法は、アルベド方式の理論式⁽¹⁾にしたがっており平面での散乱線を非常に精度良く計算できる。ただし、精度を担保するには平面かつ方向性が無視できる小さな領域に限られる。例えば曲面に適用するには平面への分割近似が必要となり、平面であっても対象面が広い場合は線源や評価点との位置関係が一様と言える程度での分割近似が必要となる。また、X線のエネルギー（ここでのエネルギーは[W]ではなく[eV]）1種に対し1計算が必要であり、エネルギーが連続分布を持つEPSからのX線の評価では、エネルギーに対しても分割近似が必要である。さらに、そのエネルギーは散乱1回毎に変動する上、散乱方向によって連続的に変化するため、経路上の部品数や散乱回数が増えると計算数が指数関数的に増加していく。加えて、この手法は薄い部材で減弱を受けつつ透過散乱するような計算には直接適用できない。これらの特徴から、数多くの部材が配置されている2階タンク内部を経由するような経路に対しては部材による減弱を無視せざるを得ず、より安全を考慮した評価を行う必要があった。

当社では、従来から、これらの2手法を使い分けて

いた。どちらの手法も計算機を使用しない時代に安全性を優先し、長い時間を要せずにより安全を考慮した評価（遮蔽コスト大）になるものであり、最適化設計を行うための計算手法ではなかった。

3. 新手法による遮蔽材削減設計

3.1 新手法の適用

従来手法の問題点に対処するため、EGS5^{*1}およびPHITS^{*2}という2つの計算コードを用いて、計算機シミュレーションを実施し、新手法の検討を開始した。

EGS5とPHITSの基本であるモンテカルロ法での精度は、計算したい領域に辿りついたデータ点数が直接影響する（通常は計算値の標準偏差=√点数）。そのため、遮蔽評価地点でのX線粒子の到達数が、発生源付近に対して数兆分の1、またはそれより少なくなるような場合や、遮蔽体透過後の低線量値については、計算精度が落ちることをある程度予想していた。

当社のEPS「EB-XW」⁽²⁾の遮蔽設計に同手法を適用したところ、データ点数（≒黄色線数）が十分であるのは遮蔽体やタンクの内部までであった（図2）。遮蔽体透過後の低線量域は、いくつかのデータからの対数補間を併用するもので直接計算しておらず、その計算精度を補うために、手計算も併用しつつ概算による遮蔽材削減の見積を開始した。

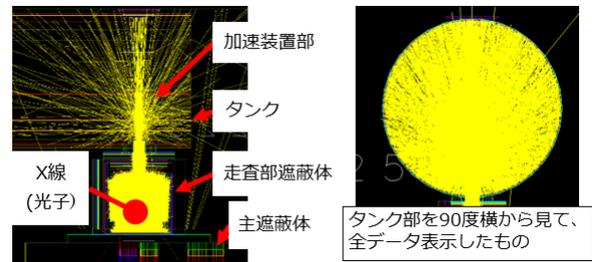


図2 EB-XW遮蔽設計時のEGS5による計算結果

3.2 遮蔽材の削減見積計算

EB-XW遮蔽設計時と同様に、遮蔽材を増した際の低線量域に対しては直接計算せずに補間する手法でコンクリート遮蔽の検討を進めたところ、2階部分のコンクリートを除去しても、タンクの厚みを増すことで、作業者が常駐する1階部分等の線量を十分に低くできることが推定された。この推定値は、概算や類似単純形状のシミュレーションに基づいているためリスクが大きい。しかし、想定される最もリスクがある値であっても、タンクの厚みを増しただけの状態からさらに少量の遮蔽材を追加する処置を施すことで、2階部分のコンクリートが不要になるという計算結果が得られた。

ここまでの概算検討を経て詳細設計段階に移行したが、当初は、2階部分に配置した鉄材がわずか100mmであっても、透過する光子（X線）点数が200点程度となるために必要な電子数は100億点であり、計算に約20時間を要していた。この点数は非常に小さく、光子1点が評価位置に到達するか否かで線量評価が数十mSv/hr変わる状態であった。モンテカルロ手法を工夫しないのであれば、算出したい線量にほぼ反比例して計算時間が長くなるため、1階部分が法令基準レベルを満たしているか（数 μ Sv/hr）を判断するための計算時間は少なくとも10,000日と見積もられた。タンク内部やタンク付近の構造を追加していくとさらに10倍程度の時間を要することが予想できたため、詳細設計を進める前に、まず初期段階での計算手法の改良を行った（図3）。

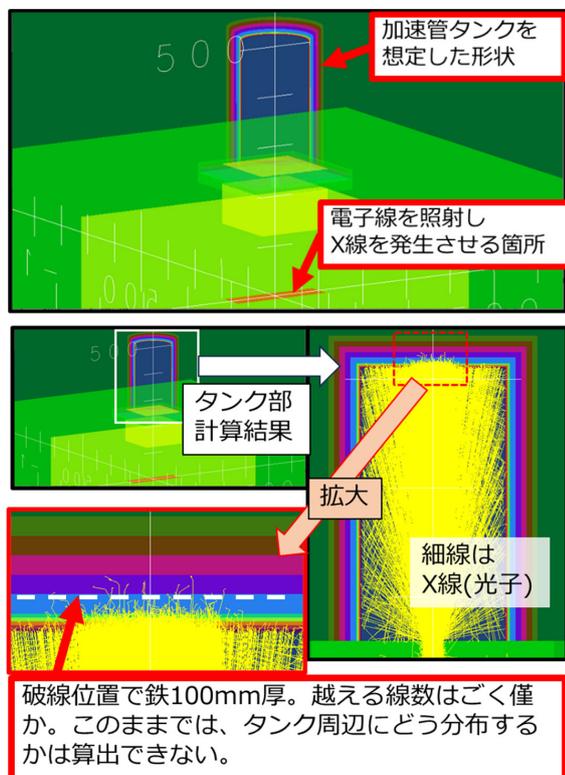


図3 初期段階でのEGS5による計算結果

3.3 計算手法の改良1

電子線照射部で発生したX線のうち、設計検討対象である2階構造に至るのはごく一部で、その内ほぼ全量が電子線照射部直上の開口を通過する（第2章を参照）。この開口に向かうのは発生したX線全数の1%未満であり、さらにこの時点の計算は電子照射から開始するため、この開口を通る光子1点のために電子約3万点が必要であった。もしこの開口を通過するX線群を数式化して直接表現できれば、

それを開口位置から光子を直接発生させる光子線源とすることで計算速度を劇的に改善することが可能になる。そこで、開口通過後の光子様相を分析し、開口を通過するX線群の数式化・光子線源化を試みた。

まず、開口を通過して2階側に抜けた光子群について各種パラメータの統計を取り、パラメータ同士の相関の有無を調べ、有る場合はどのような式で表現できるかを全パターンで分析し、数式化した。作成した光子線源を用いて計算を行ったところ、電子照射から計算を開始した場合と比較して、23,000倍高速化することができた。以降、この線源を使用して検討を進めた。

3.4 計算手法の改良2

詳細設計期間の中盤で、EGS5と同様の計算が可能なPHITSを使用する検討に移行した。PHITSにはEGS5にない機能が実装されており、低線量域の計算効率をさらに上げ、詳細設計中の部品配置や想定からのズレによる計算時間増加を押さえることができた。最終的には、1階の作業者常駐範囲までの線量を40時間（精度を妥協する場合は半日サイクル）で算出できた。ここで活用したPHITS実装済み機能（分散低減法、エネルギー分布のウェイト分布化）とその効果について、本節にて説明する。

3.4.1 分散低減法

分散低減法にはさまざまな手法があるが、今回はウェイトウィンドウ法を活用した。これは、区間毎に条件を設定してウェイト（評価値、重み付け）を下げる代わりに再試行を許すことで、起こりにくい事象（低線量）を効率よく計算する手法である。

例えば、10回に1回しか通れない壁が2枚続いていたとする。通常の遮蔽計算では、2枚を1回で通り抜ける場合の解析回数は掛け算となり、平均10×10回の試行が必要となる。一方、1枚の壁を通り抜ける毎にセーブ・ロードして良い場合、試行回数は足し算となり10+10回程度で済む。ウェイトウィンドウ法はこのセーブ・ロードに近い方法であり、部品追加による計算時間の増加を、掛け算ではなく足し算による増加に留めることができる。

上記例ではウェイトウィンドウ法は簡単な設定に見えるが、実際の計算において「何回に1回通れるか」は材料、X線エネルギー、設定距離等に依存するため、場所や到達経路によりさまざまに変化する。現時点でも設定の最適値は決定しきれていないが、それでもウェイトウィンドウ法の導入効果は大きく、計算時間増加を数割程度に抑えることができた。

3. 4. 2 エネルギー分布のウェイト分布化

EGS5を用いた手法では、エネルギー分布は現実の事象と同じ発生確率の大小で表現していた。ウェイト分布とは、発生確率の大小を全て同じに補正（強制）する代わりに、確率が元よりA倍に補正されていれば評価値を1/A倍に補正する（平均値としては同じ）というものである。モンテカルロ法で統計的な値を算出するには事象の発生が重要なため、計算したい値に対して寄与が大きい事象の発生確率が小さいほど、ウェイト分布化は効果が高まる。

遮蔽計算において線量寄与が大きいのは遮蔽体を透過しやすい高エネルギー側であるが、その発生確率は低エネルギー側と比較し数桁小さい。詳細設計で計算を進める過程で、1階の線量の寄与は大部分が高エネルギー側ということが明らかになってきた。そのため計算時間が当初の想定より1桁近く増加することが懸念されたが、ウェイト分布化が有効に働き、計算時間の増加を抑えることができた。

3. 5 設計結果

前節で紹介した計算手法を活用し、設計したハイブリッドシールド型のEPSと、図1で示した既存のコンクリートシールド型との比較を図4に示す。ハイブリッドシールド型では、2階部分のコンクリートが不要であるため材料の低減ができています。また、2階部分のタンク内（=コンクリート内側）に電源部材を全て収める必要がなくなり、レイアウトの自由度が増している。

このハイブリッドシールド型での線量分布を図5に示す。現実には、最終計算時においてモデル化配置していない細かな部品によるX線減衰も生じる。また、この計算では電子線の全量を鉄ターゲットに照射しているが、実際に電線被覆へ照射する際は、X線発生量は計算時よりも低くなる。したがって、この計算結果は、実測結果に対し、より安全を考慮したものとなっており、このことは、実測によっても確認した。

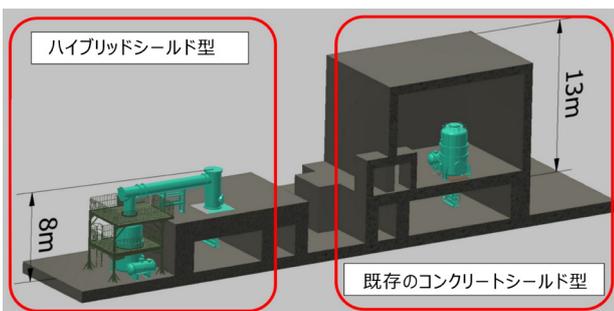


図4 ハイブリッドシールド型とコンクリートシールド型の比較

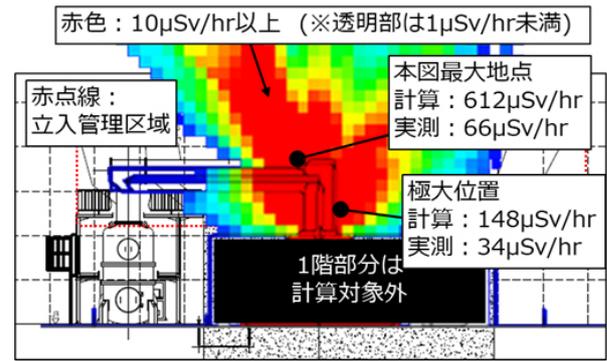


図5 周辺線量分布（ハイブリッドシールド型断面）

4. 性能検証結果

4. 1 検証試験結果

実際の装置を製作し、X線量の実測値が設計どおりに計算値以下であるかを確認した。測定位置は主にタンク表面とした。いくつかの数値を図5に示す。全位置において実測値は計算値より低く、今回の構造および設計手法での安全性が確かめられた。

4. 2 計算手法としての今後の課題

今回、遮蔽後の低線量評価にモンテカルロ法での計算機シミュレーションを用い、計算時間短縮のためにさまざまな工夫を加えて設計を完了させ、実測値が設計値以下となることも確認できたが、次のような課題も見えた。

① 迷路構造の計算

今回は1階部分を実績のある従来構造のままとしたため計算対象としなかったが、1階部分には迷路構造も存在する。迷路構造は、今回の計算対象よりもさらにモンテカルロ法が苦手とする構造である。迷路構造は人や物の通過を目的としたもので、経路を直進させないことにより遮蔽材無し（散乱のみ）でX線を減衰させる構造である。この構造は今回適用した分散低減法と非常に相性が悪く、計算速度か精度のどちらかに無理が生じる。コンクリートシールド全体の低減を進めていく場合、この迷路構造も効率よく計算できるような改善が必要となる。

② 計算の統計精度

今回は開発検証であったため、標準偏差±30%程度の精度でも試験を行った。また、今回の計算対象は数m～数十mの範囲を俯瞰して評価できたため、精度に直結するデータ点数を多く取ることができた。しかし法令に定められた許可申請等では、対象国にもよるが、実測値ではな

く計算値の統計精度が十分であることが要求される。さらに、計算速度と精度の両立が現状では困難な迷路構造も評価対象となる。一か所あたり週～月単位の計算時間が見込まれる経路もあり、手計算との複合等も視野に入れ、さらなる手法の改善が必要となる。

5. 今後の展開

今回、遮蔽解析手法の改良によりコンクリート遮蔽の小型化が実証され、高加速電圧のEPSへの導入が容易になったと考える。特に電線市場では、ハイブリッド車や電気自動車の普及に伴い、より高い耐電圧・大電流対応の電線の需要が高まっている。コンクリート遮蔽の小型化により、EPS設備の導入が拡大し、効率的な製造プロセスと高品質な電線の生産が可能となり、電線市場の拡大に寄与することを期待する。

さらに、自己シールドのコンパクト化にも取り組んでいく。現在、自己シールドは高密度な遮蔽材を使用することでコンパクトな設計が可能となっているが、設計改善によりさらなる小型化と効率化を目指す。

最後に、当社が半世紀以上にわたり培ってきたEPS技術を、急速に変化している自動車産業の発展に貢献できる形で活用し、さらなる技術開発や利用分野の拡大を推進していく所存である。

用語集

- ※1 EGS5⁽³⁾
Electron Gamma Shower Version 5の略であり、モンテカルロ法による電子・光子輸送計コードである。スタンフォード線型加速器研究所(SLAC)を中心に開発されてきた。日本では高エネルギー加速器研究機構(KEK)が管轄している。当社では2008年頃より電子線の分布計算用として活用を開始しており、2018年頃よりX線の遮蔽計算用としての活用もはじめた。
- ※2 PHITS⁽⁴⁾(論文中で使用したVersionは3.320)
Particle and Heavy Ion Transport code System(粒子・重イオン輸送計算コード)。あらゆる物質中でのさまざまな放射線挙動を核反応モデルや核データなどを用いて模擬するモンテカルロ法による計算コード。

参考文献

- (1) 公益財団法人 原子力安全技術センター：「放射線施設のしゃへい計算マニュアル」, pp.2—9-2—11(2015)
- (2) 永井, 馬場, 水谷：「新型電子線照射装置EB-XWの開発」、日新電機技報、Vol.69、No.2, pp.29-33(2024.11)
- (3) H. Hirayama, Y. Namito, A.F. Bielajew, S.J. Wilderman and W.R. Nelson : The EGS5 Code System. SLAC-R-730 and KEK Report 2005-8 : 2005
- (4) T. Sato, Y. Iwamoto, S. Hashimoto, T. Ogawa, T. Furuta, S. Abe, T. Kai, Y. Matsuya, N. Matsuda, Y. Hirata, T. Sekikawa, L. Yao, P.E. Tsai, H.N. Ratliff, H. Iwase, Y. Sakaki, K. Sugihara, N. Shigyo, L. Ishver and K. Niita: Recent improvements of the Particle and Heavy Ion Transport code System - PHITS version 3.33, J. Nucl. Sci. Technol. 61, 127-135(2024)

執筆者紹介



林 泰隆 Hayashi Hiroataka
株式会社NHVコーポレーション
技術部 グループ長



梅村 純平 Umemura Junpei
株式会社NHVコーポレーション
技術部 主任