

# 天然岩石を用いたコンクリート系及び樹脂系中性子遮蔽材料に関する研究

Study on Neutron Shield Concrete and Resin Based on Natural Minerals



奥野功一 Koichi OKUNO \*1

## 要 旨

近年、J-PARCに代表される中性子利用や、中性子捕捉療法 (BNCT) に代表される医学利用が盛んになってきている。しかし、中性子の遮蔽には分厚いコンクリート壁が必要となるため、施設の建設に広い敷地が必要となることや、室内空間も手狭となる。そこで遮蔽をコンパクトにし、上記のような利用施設を狭い敷地にも建設可能とするためには、より高性能な遮蔽材料が必要である。そのため、新たな遮蔽材料として、2つの材料の研究を行った。1つは主に線源周りを局所的に遮蔽する事により、壁厚を薄くする事を目的とした樹脂系中性子遮蔽材料、もう一つは、建屋の壁に構造体として使用できる中性子遮蔽コンクリートである。両者とも実用化を主眼に置いて研究を行った。

中性子の遮蔽に効果的な元素のうち、入手が容易で低コストな元素は中性子のエネルギー昇順にホウ素、水素、鉄である。ただし、鉄については重量が重く、製造・施工コストが上昇するため遮蔽材料に混合しない方針で研究を進めた。

局所的な遮蔽においては、高性能であるほど建屋の壁厚が薄くできる。そのため、水素原子数が多く耐放射線性の高いエポキシ樹脂と、コストの観点から過去に実施例の無いホウ素含有岩石であるコレマナイト岩石を使用した。工場生産を鑑み、コレマナイトの含有量の最適化検討を行った結果、コレマナイト粉体をエポキシ樹脂に対して200wt%とした場合に品質上問題無く製造できる事が判った。<sup>252</sup>Cf中性子源に対する遮蔽性能実験を行った結果、中性子遮蔽樹脂材の1/10価層は11.5cmである事が判り、コンクリートの約3倍である事が判った。また、当該材料から出る2次γ線に起因する線量は、最大でポリエチレンの1/46.5、ホウ素10wt%入りポリエチレンの1/3.8である事が判った。また、力学的強度や熱的特性では、全ての点においてポリエチレンより性能が富むこと判った。本研究により、型枠さえあれば、流し込みで常温成形することが出来る新しいタイプの中性子遮蔽樹脂材を見出せた。本中性子遮蔽材は、既に商品化されておりJ-PARC等で使用実績もある。

次に建屋の壁に構造体として使用できる中性子遮蔽コンクリートの研究を行った。遮蔽性能の高いコンクリートに関する研究は1950年代～1960年代に多く行われているが、当時は原子炉向けの小型ブロックの研究に主眼が置かれ、建屋の構造体として使用できる遮蔽用コンクリートの研究は行われていなかった。本研究では中性子遮蔽性能を高めるため、コンクリートの粗骨材に水素含有量の多いかんらん岩を、細骨材にかんらん岩とコレマナイト岩石を用いたコンクリートの研究を行った。その結果、コレマナイト岩石の含有量をコンクリートに対し10wt%に制限することにより、構造体にも適用できる中性子遮蔽コンクリートが製造可能であることを見いだした。本コンクリートに対し、<sup>252</sup>Cf中性子源を用いた遮蔽性能実験の結果、普通コンクリートと比べて約1.7倍 (線量減衰率1/100での値) の遮蔽性能を持つことを実験で確認した。中性子遮蔽コンクリートを使用した中性子捕捉療法施設に対するモデル解析の結果、普通コンクリートでは140cmの遮蔽壁が必要である所を、中性子遮蔽コンクリートを用いれば90cm厚で済むことが判った。

さらに、放射化分析による微量元素分析を実施し、その分析結果を用いて中性子捕捉療法施設に対する放射化量評価を行った結果、壁表面～10cm深さにおける中性子遮蔽コンクリートの短半減期核種生成量は、従来から低放射化といわれる石灰岩コンクリートの約1/100に、<sup>60</sup>Co生成量は石灰岩コンクリートの1/5～1/8となる事が判った。

本研究で開発した樹脂系中性子遮蔽材料と中性子遮蔽コンクリートをJ-PARCの物質・生命科学実験施設にあるBL-15大強度型中性子小角散乱装置 (大観) の分光器遮蔽体に適用した結果、従来遮蔽材として内壁全面に用いられていたホウ酸レジン無くし、かつ最大30%の遮蔽厚の低減が実現できた。この合理化により、30%以上の建設コストの低減が実現できた。また、BL-09特殊環境中性子回折装置 (SPICA) にも適用した結果、52mのビームライン遮蔽体に中性子遮蔽コンクリートを全面適用する事により、従来ビームライン全域に渡って必要であった20cm厚の鉄をゼロとする事が可能となった。これにより、建設コストの大幅なコストダウンが実現できた。

本研究の成果物である本中性子遮蔽コンクリートと樹脂系中性子遮蔽材は、上に述べたBL-15大強度型中性子小角散乱装置 (大観)、BL-09特殊環境中性子回折装置 (SPICA) 以外にも、BL-21高強度全散乱装置 (NOVA) の分光器遮蔽体、さらには理化学研究所 小型加速器中性子源の遮蔽壁にも採用され、放射線障害防止法に伴う国の放射線施設検査に合格している。

中性子遮蔽コンクリートと樹脂系中性子遮蔽材を中性子の遮蔽に適用することによって、従来の遮蔽構造に比べて余分なコストを掛けることなく、遮蔽のスリム化が実現可能となるため、J-PARCなど複数の分光器が並んで狭隘な場所や、建設スペースのゆとりが欲しい小型加速器中性子源施設等に有効なものと言える。

キーワード：中性子，コンクリート，遮蔽，エポキシ樹脂

#### Summary:

Neutron shielding is very important for construction of neutron facilities. Concrete is usually used for neutron shielding. Although concrete is inexpensive, massive thickness is required. In recent years, there has been a need for a compact shielding design such as self-shielding of PET cyclotron or upgrading of radiation machinery in existing facilities. In these cases, high-performance shielding materials are needed. Concrete or polyethylene has been used for neutron shields. However, for compact shielding, they fall short in terms of performance or durability. Therefore, a new type of neutron-shielding material based on epoxy resin and colemanite has been developed. Slab attenuation experiments up to 40 cm for the new shielding material were carried out using a  $^{252}\text{Cf}$  neutron source. Measurement was carried out using a REM counter, and was compared with the calculation. The results show that the shielding performance is better than concrete and polyethylene mixed with 10 wt% boron oxide. From this result, we confirmed that the performance of the new material is suitable for practical use.

A novel neutron-shielding concrete using colemanite rock and peridotite rock was also developed. Its shielding performance was evaluated through transmission experiments using a  $^{252}\text{Cf}$  spontaneous fission source and calculations with the MCNP5 code. The results show that a neutron 1/100 attenuation length of the neutron concrete shield with a typical colemanite content of 10 wt% is shorter by a factor of 1.7 than that of normal concrete. The results show that the shielding performance becomes better when the thickness is still thicker and the incident neutron spectrum is softer.

Trace element analysis using instrumental neutron activation analysis for neutron-shielding concrete made from colemanite and peridotite rocks is carried out. Also, an activation estimation for the concrete wall in the accelerator neutron source facility is made using the element data obtained. The results show that the amount of short-half-life nuclide production in the neutron-shielding concrete is 1/100 that of limestone concrete and also that the amount of  $^{60}\text{Co}$  production is 1/5 to 1/8 that of limestone concrete. From these results, the activation property of the neutron-shielding concrete was found to be much lower than that of limestone concrete, which has been previously reported as having low activation.

The main neutron shield for the neutron beam line and neutron spectrometer at the Japan Proton Accelerator Research Complex (J-PARC) consists of multilayers of iron and ordinary concrete or boric acid resin and ordinary concrete. However, the available space inside the shield will become limited since a multilayer shield must have sufficient thickness to guarantee radiation safety outside of the shield. A neutron-shielding concrete was developed and applied to the shield for the TAIKAN neutron-scattering instrument at J-PARC. Neutron transport calculations revealed that the shield's thickness could be reduced to about 70% of that of the original design, which used ordinary concrete. The resulting slim neutron-shielding structure could leave more space in the interior shielded areas.