

中性子を 효율적으로 차폐하기 위해 (1)

— 차폐성능이 좋은 재료선택 —

植木 雄太郎

Kontanro Ueki

운수성 선박기술연구소 원자력기술부

중성자 차폐는 감마선에 비해 귀찮은 일이며, 게다가 경제성도 나쁘다. 고속중성자는 원자핵과의 상호작용(산란)에 의해 서서히 에너지를 잃어, 마침내 열중성자가 되어 원자핵에 흡수되지만, 그 과정에 있어 상당한 비율의 2차적 중성자 내지 감마선의 발생을 수반한다. 이 2차 입자의 발생이 중성자의 차폐를 보다 어렵게 하고 있다. 따라서 이러한 중성자를 조금이라도 효율적으로 차폐하는 방법은 없을까라는 관점에서 우선 차폐성능이 좋은 재료를 사용해야 함과 성능이 좋은 재료개발에의 방향성에 대해 논하고, 다음 호에는 경제성을 고려하여 각종 재료를 조합한 최적차폐의 구축에 대해 소개한다.

1. 머리말

우리 가까이에 있는 중성자원으로서 잘 알려진 ^{235}U 의 핵분열에 의해 발생하는 평균 에너지 1.94MeV의 중성자, RI중성자원으로 최근 손쉽게 이용되고 있는 ^{252}Cf 의 자발 핵분열에 의해 발생하는 평균에너지 2.35MeV의

중성자, D-T핵융합반응에 의해 발생하는 14MeV의 중성자 등이 있다. 이러한 고속중성자를 어떻게 하여 목적에 따르고 또한 경제적인 열중성자(약 0.025eV)로 할 것이냐가 차폐에 부과된 중요한 테마이다. 열중성자의 플루엔스 1선량당량 환산계수는 고속중성자의 수십분의 1로 아주 작다.

고중성자가 열중성자로 되기 위해서는 원자핵과의 산란(크게 나누어 탄성산란과 비탄성산란)을 반복하여 약 $1/10^8$ 이하로 에너지를 감소시키지 않으면 안된다. 그리고 그 과정에서 원자핵과의 반응에 의해 2차적인 중성자와 감마선 등의 발생이 있으며, 더욱이 겨우 열중성자가 되어도 최후에 원자핵에 흡수되는 과정에서 비교적 높은 에너지(1MeV 이상)의 감마선 발생을 수반하는 경우가 많다. 이것 또한 중성자 차폐를 한층 어렵게 만드는 한가지 요인이다. 그러나 현재 방사선 차폐계산은 연속에너지 몬테카를로 코드(이를테면 미국 로스알라모스 연구소에서 만든 MCNP코드를 사용함으로써 매우 상세히 중성자의 활동을 시뮬레이션

할 수 있다. 이 시뮬레이션 기술을 응용함으로써 보다 좋은 중성자 차폐재의 개발 내지 각종 차폐재 중에서 목적에 알맞는 재료를 선정하고, 또한 그 재료를 조합하여 가장 적절한 차폐배열을 구축하는 것도 가능하다고 생각된다.

2. 각종 재료의 특징

우리가 손에 넣을 수 있는 재료는 무한히 있다. 그 중에서 선박기술연구소에서 ^{252}Cf 중성자원을 사용하여 차폐실험에 이용된 재료 내지 실험과의 비교를 위해 차폐성능을 계산으로 평가한 재료에 대해 그 특징을 소개한다.

(1) 물

물은 가장 경제적인 중성자 차폐재이지만 100°C 에서 비등하여 기체가 된다. 수송의 함유량이 많기 때문에 중성자의 감속효과가 뛰어나지만, 열중성자에 대한 중성자 포획 단면적도 제법 크기 때문에 다수의 2차 감마선이 발생한다. 물을 사용한 경우에는 이 2차 감마선을 고려하여 바깥 쪽에 鉛板 등을 설치하는 것이 좋다.

(2) 폴리에틸렌

폴리에틸렌도 비교적 경제적인 (1kg에 4~5천엔 정도) 중성자 차폐재이지만, 열에 약하고, 軟化點이 약 40°C 이다. 폴리에틸렌은 물보다 수소의 함유량이 많으므로 고속중성자에 대한 감속효과는 매우 좋으나, 반면에 물보다 2차 감마선의 발생량이 많아진다. 폴리에틸렌에 소량의 보론을 첨가하여 2차 감마선의 발생을 저감한 재료도 시판되고 있지만, 상당히 비싸다. 물의 경우와 마찬가지로 바깥 쪽에 鉛板 등을 설치하는 것도 2차 감마선 대책으로 효과가 있다.

(3) 일반 콘크리트

중성자 차폐를 목적으로 삼은 재료는 아니지만 경제성이 뛰어나 공간만 있으면 두께 2m 이상의 차폐재를 만드는 것도 용이하다. 일반 콘크리트는 골재(모래, 자갈)에도 의하지만, 밀도 2.2 g/cm^3 정도이며 수소를 0.5중량% 정도 포함하고 있다. 중성자 차폐성능은 그다지 좋지 않지만, 연속 사용온도는 약 93°C 이며 제법 고온에서의 사용이 가능하다. 2차 감마선의 발생보다 오히려 방사화가 문제가 된다.

(4) 蛇紋岩 콘크리트

골재가 되는 돌의 표면이 뱀의 표피와 닮아 있다는 점에서 이름이 붙여진 사문암 콘크리트는 밀도가 2.3 g/cm^3 정도이며, 그밖의 기계적 특성이나 내열성 등은 일반 콘크리트와 같지만, 수소의 함유량이 일반 콘크리트의 0.5중량%에 대해 1.9중량%로 많기 때문에 일반 콘크리트에 비해 상당히 양호한 중성자 차폐효과를 지니고 있다. 최근 사용될 핵연료 운반선으로 건조된 「六榮九」의 중성자 차폐재로 사용되고 있다.

(5) 스테인레스綱

스테인레스강도 오로지 구조재로 사용되고 있다. 밀도가 7.9 g/cm^3 이므로 감마선에 대해서는 제법 좋은 차폐재가 되지만 중성자 차폐에 대해서는 단독사용의 경우 차폐성능이 좋지 않다. 그러나 스테인레스강은 철, 니켈, 크롬 등의 中重核으로 구성되어 있으므로 1MeV 이상의 고속중성자를 단숨에 중속중성자로 감속하는 비탄성산란의 단면적이 크다. 스테인레스강이나 폴리에틸렌과 같은 수소 함유량이 많은 재료와 조합함으로써, 차폐재료를 단독으로 사용한 경우보다 단위 두께당 중성자 차폐성능(이를 테면 1/10價層)을 향상시킬 수가 있다. 이 현상을 스테인레스강의

고양효과(Enhancement Effect)라 부른다. 보통의 탄소강에 대해서도 같은 중성자 차폐특성을 볼 수 있다.

(6) 레진F

레진F는 프랑스 COGEMA(주)가 개발한 폴리에스텔계 레진(수지)이며, 열중성자에 의한 2차 감마선의 발생을 저감하기 위해 보론이 첨가되어 있다. 프랑스에서 반환되는 높은 레벨의 유리 고화체 수송용기의 중성자 차폐재로 사용되고 있다.

(7) NS-4-FR

NS-4-FR은 일본의 원전공사(주)가 기술적 노하우를 가진 에폭시계 레진이며, 열중성자에 의한 2차 감마선을 저감하기 위해 1.2중량%의 보론 카바이트(B₄C)를 첨가하고 있다. 일본의 고연소도 사용될 연료수송 용기의 중성자 차폐재로 사용되고 있다.

(8) KRAFTON-HB

KRAFTON-HB는 고속증식로의 중성자 차폐재를 위해 사노야산업(주)가 개발한 레진으로, 용점은 200℃ 이상이다. 또한 2차 감마선의 발생을 저감하기 위해 보론을 첨가할 수 있다.

(9) 붕화티탄

붕화티탄(TiB₂)은 세라믹이며, 매우 단단하여 연화온도가 2800℃로 특히 내열성에 뛰어나다. 또한 티탄이 고속중성자에 대해 비교적 큰 비탄성산란 단면적을 갖고, 보론이 열중성자에 대해 매우 큰 포획단면적을 갖는 등 중성자 차폐재로서도 활용될 것 같지만, 최대의 약점은 1kg당 수만원 이상이라는 점이다.

(10) 질화붕소

질화붕소(BN)도 세라믹재이며, 연화온도가

2200℃로 높으며 특히 열전도율이 좋다. 보론을 다량으로 함유하기 때문에 2차 감마선의 저감효과가 크지만, 세라믹이므로 붕화티탄 정도는 아니나 역시 코스트가 높다.

3. 중성자 차폐실험에 의한 성능평가

선박기술연구소에서 그림 1에 제시한 것과 같은 중성자 차폐실험을 실시하여 각종 재료의 중성자 차폐성능을 종합적으로 평가하였다. 중성자원은 ²⁵²Cf이다. 타입1은 차폐체 단독의 성능을 평가하는 것이며, 본고에서 채택하는 실험체계이다. 타입2는 스테인레스강과의 조합에 의해 차폐체의 성능이 어떻게 변화하는가를 보기 위한 체계이다. 본 체계의 실험결과에 대한 상세한 설명은 다음 호의 2 「차폐체의 조합과 최적차폐」에서 하겠지만, 결과적으로는 스테인레스강을 선원측에 두고 검출기측에 차폐체를 설치함으로써 감재의 고양효과를 끌어낼 수가 있어, 차폐체를 타입1과 같이 단독으로 사용하는 것보다 명백하게 차폐성능이 향상된 것이 실증되었다. 타입3은 스테인레스강 사이에 샌드위치 모양으로 배열하여 2차 감마선을 포함하여 체계를 투과한 선량당량을 최소로 하기 위한 최적차폐 배열을 구축하는 실험 체계이다. 타입3에 대한 상세한 설명은 다음 호에 미룬다.

다음으로 실험결과와 결과를 바탕으로 한 1/10價層(본고의 경우는 중성자의 선량당량을 10분의 1로 저감하는데 필요한 차폐재의 두께. 차폐재의 형상은 평평한 판형으로 한다)에 대해 논한다.

그림 2는 그림 1의 타입1 체계로 실시된 실험결과를 나타낸 것이다. 그림 2에서 알수 있듯이 차폐체 단독일 경우 수소 함유량이 많은 폴리에틸렌이 가장 성능이 좋고, 다음으로 중성자차폐를 목적으로 개발된 NS-4-

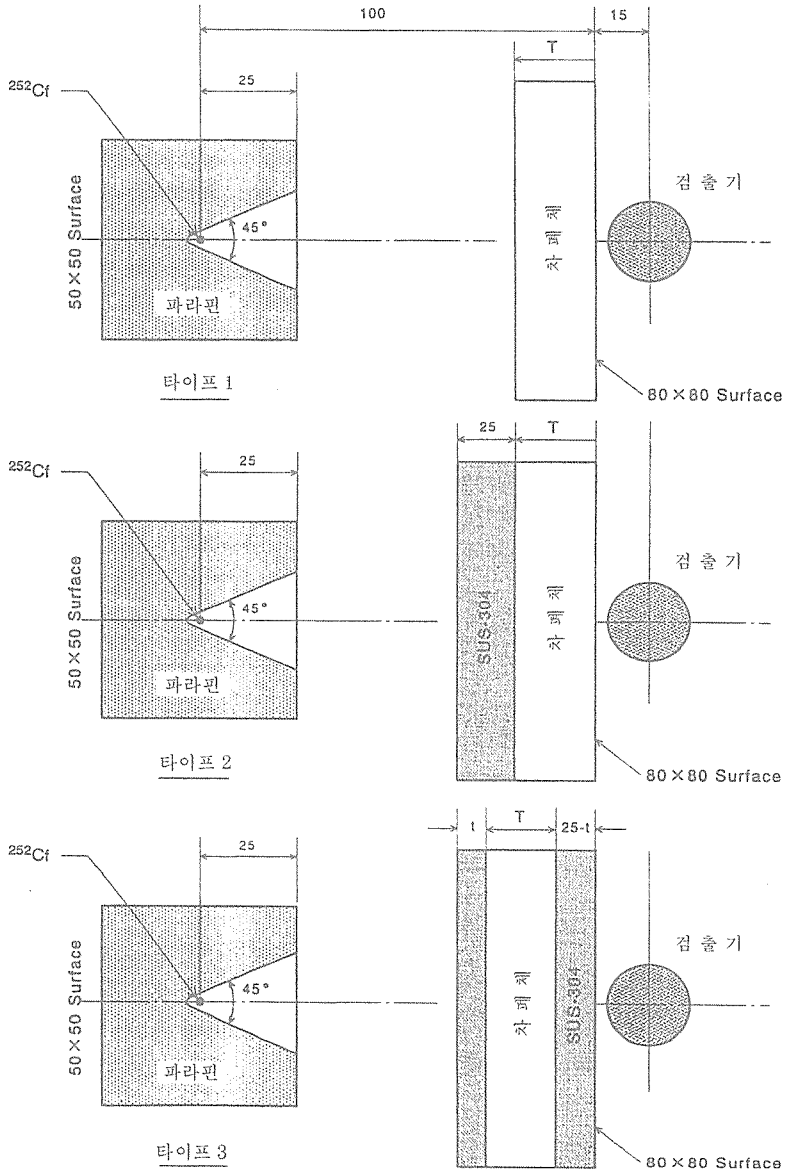


그림 1 중성자차폐실험배치도 (단위 : cm) : 타이프1은 차폐체단독, 타이프2는 SUS-304와 차폐체와의 조합, 타이프3은 SUS-304사이에서 차폐를 샌드위치 모양으로 배열하여 최적차폐 배열을 구축하기 위한 실험체계

FR, 레진-F가 좋다. 또한 수소를 많이 함유한 사문암 콘크리트도 상당한 중성자 차폐효과가 기대되지만, 예측한 대로 스테인레스강 단독으로는 중성자에 대한 차폐성능이 좋지 않다.

표 1은 그림 2를 바탕으로 각종 차폐재의 중성자에 대한 1/10價層을 정리한 것이다. 표 1에 (계산치) 있는 차폐재에 대해서는 연속 에너지 몬테카를로 코드 MCNP4A를 사용하여 계산한 값이며, 계산체계는 그림 1의 타이프 1을 충실히 모델화한 것이다. 이 표에서 알 수 있듯이 일반 콘크리트나 스테인레스강

표 1 ^{252}Cf 중성자원을 사용하여 실험에서 얻은 차폐재에 대한 1/10價層

차 폐 재	1/10價層 (cm)
폴리에틸렌	12.5
NS-4-FR	14.5
KRAFTON-HB	14.5
레진	15.0
물	16.5 (計算值)
사문암 콘크리트	20.0
일반 콘크리트	35.0 (計算值)
붕화티탄	23.0
탄화크롬	24.0 (計算值)
질화붕소	30.5
SUS-304	37.5

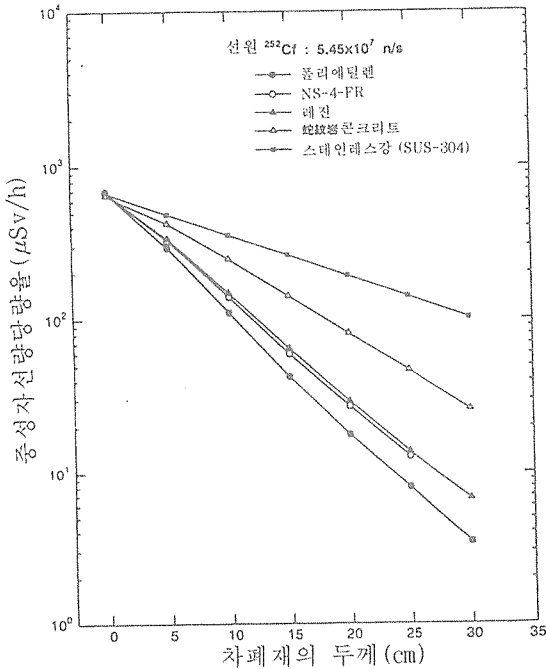


그림 2 그림 1의 타이프1의 실험체계에서 얻은 각종 재료의 중성자선량당량을 감쇠특성

은 폴리에틸렌에 비해 같은 중성자선량당량을 저감하기 위해서는 약 3배의 두께가 필요하게 된다.

4. 맺는 말

차폐재를 단독으로 사용하는 경우의 중성자 (^{252}Cf : 평균 에너지 2.35MeV)에 대한 차폐 성능에 대해서는 표 1을 참조하면 대충 이해할 수 있지만, 실제로 차폐재로 사용하는 경우에는 본고의 2. 「각종 재료의 특징」에서 밝힌 바와 같이 온도나 힘 등의 사용환경에 유의하는 것도 필요하다. 또한 가능하다면 다음호의 2 「차폐재의 조합과 최적차폐」에서 소개하는 바와 같이 최적차폐 배열을 구축하는 것도 경제성도 고려한 합리적 차폐설계, 제작을 실시하는데 있어 중요한 과제라 사료된다.