



## K-DEMO 핵융합실증로의 증식블랭킷 방사화 특성 평가 및 붕괴열 처리 설계

Analysis on the Radio-activation and Decay Heat Induced by Fusion Neutrons in K-DEMO Breeding Blanket

---

저자 (Authors) 김범석, 임기학, 김홍택, 권성진, 박종성  
Beom Seok Kim, Kihak Im, Hong-Tack Kim, Sungjin Kwon, Jong Sung Park

출처 (Source) [대한기계학회 논문집 C권 7\(1\)](#), 2019.3, 1-7(7 pages)  
[Transactions of the KSME C Industrial Technology and Innovation 7\(1\)](#), 2019.3, 1-7(7 pages)

발행처 (Publisher) [대한기계학회](#)  
The Korean Society of Mechanical Engineers

URL <http://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE07623830>

APA Style 김범석, 임기학, 김홍택, 권성진, 박종성 (2019). K-DEMO 핵융합실증로의 증식블랭킷 방사화 특성 평가 및 붕괴열 처리 설계. [대한기계학회 논문집 C권](#), 7(1), 1-7

이용정보 (Accessed) 서울과학기술대학교  
117.17.182.\*\*\*  
2021/03/08 20:07 (KST)

---

### 저작권 안내

DBpia에서 제공되는 모든 저작물의 저작권은 원저작자에게 있으며, 누리미디어는 각 저작물의 내용을 보증하거나 책임을 지지 않습니다. 그리고 DBpia에서 제공되는 저작물은 DBpia와 구독계약을 체결한 기관소속 이용자 혹은 해당 저작물의 개별 구매자가 비영리적으로만 이용할 수 있습니다. 그러므로 이에 위반하여 DBpia에서 제공되는 저작물을 복제, 전송 등의 방법으로 무단 이용하는 경우 관련 법령에 따라 민, 형사상의 책임을 질 수 있습니다.

### Copyright Information

Copyright of all literary works provided by DBpia belongs to the copyright holder(s) and Nurimedia does not guarantee contents of the literary work or assume responsibility for the same. In addition, the literary works provided by DBpia may only be used by the users affiliated to the institutions which executed a subscription agreement with DBpia or the individual purchasers of the literary work(s) for non-commercial purposes. Therefore, any person who illegally uses the literary works provided by DBpia by means of reproduction or transmission shall assume civil and criminal responsibility according to applicable laws and regulations.

&lt;응용기술논문&gt;

DOI <https://doi.org/10.3795/KSME-C.2019.7.1.001>

ISSN 2288-3991(Online)

## K-DEMO 핵융합실증로의 증식블랑켓 방사화 특성 평가 및 붕괴열 처리 설계 §

김범석\*† · 임기학\* · 김홍택\* · 권성진\* · 박종성\*

\* 국가핵융합연구소 DEMO 기술연구부

### Analysis on the Radio-activation and Decay Heat Induced by Fusion Neutrons in K-DEMO Breeding Blanket

Beom Seok Kim\*†, Kihak Im\*, Hong-Tack Kim\*, Sungjin Kwon\* and Jong Sung Park\*

\* DEMO Technology Division, National Fusion Research Institute

(Received December 22, 2017 ; Revised August 27, 2018 ; Accepted January 22, 2019)

**Key Words:** Fusion Energy(핵융합에너지), K-DEMO Fusion Reactor(한국형 핵융합실증로), Breeding Blanket(증식블랑켓), Radio-activation(방사화), Decay Heat(붕괴열), Thermal Analysis(열해석)

**초록:** 국내외적으로 최근 이슈가 되고 있는 에너지 문제의 궁극적인 해결책으로서 핵융합발전기술이 대두되고 있다. 현재 국내에서는 향후 추진될 상용발전설비의 건설 및 운용에 앞서, 핵융합기술과 설비의 과학적, 공학적 실증을 위한 한국형 핵융합실증로(K-DEMO) 선행개념연구가 진행되고 있다. K-DEMO에서는 연료로 사용 될 삼중수소의 증식과 연속적인 핵융합 반응을 위한 중성자 증배를 위하여 증식블랑켓이 필수적으로 적용되어야 한다. 하지만 토카막의 운용과정에서 발생하는 중성자로 인하여, 증식블랑켓은 필연적으로 방사화가 진행되고 붕괴열을 발생하게 된다. 플라즈마 운전 직후 증식블랑켓의 구성재질인 저방사화합금 및 텅스텐에서 발생하는 붕괴열량은 수십 kW에 달한다. 이에 본 연구에서는 중성자로 인한 증식블랑켓의 방사화 특성을 살펴보고, 이로 인한 붕괴열 특성을 평가해 보도록 한다.

**Abstract:** Fusion technology is attracting attention as the ultimate new source of energy based on the abundance of its fuels and the social and environmental acceptability. The Korean fusion demonstration tokamak reactor (K-DEMO), a facility for the demonstration of scientific and engineering feasibility, is currently in the pre-conceptual design phase. A breeding blanket, which is essential in K-DEMO tokamak, is an important mechanical and functional component for both tritium breeding and neutron multiplying. However it must be radio-activated due to the neutron irradiation, and thus accompany decay heat generation during their maintenance. A component of reduced activation ferritic martensitic (RAFM) steel layer and tungsten first wall accompanies significant decay heats by tens of kilowatts after the plasma shutdown. We evaluate their radio-activated characteristics under the fusion neutron irradiation and demonstrate that thermal managements should be taken into account in the light of heat transfer aspects of cooling.

## 1. 서론

인류의 삶의 질을 결정하고 영속 가능케 하는 주요한 요소 중의 하나로서 지속 가능한 에너지원을 내놓을 수 없을 것이다. 불의 발견과 증기기관의 개발 등 인류의 과학기술 발전사를 통해 우리는 새로운 에너지원의 개발이 인류의 삶과 문화를 크게 진일보시켜 왔다는 점을 돌이켜 살펴볼 수 있다. 현대사회를 가능케 했던 에너지원으로 사용된 화석연료는 오늘날에 이르러서는 수요에 미치지 못하는 공급, 고

§ 이 논문은 2017년도 대한기계학회 학술대회(2017.11.1-3., ICC 제주) 발표논문을 토대로 한 논문임.

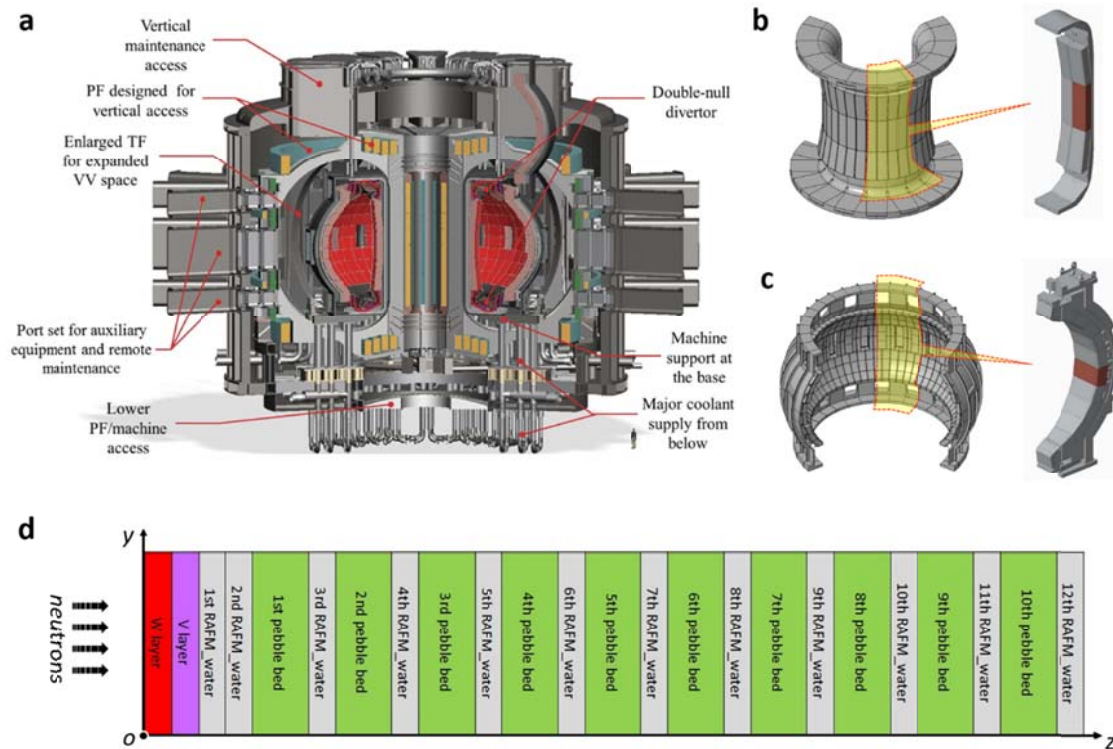
† Corresponding Author, kimmbs@nfri.re.kr

© 2019 The Korean Society of Mechanical Engineers

갈, 독점, 온실효과 등으로 인해 많은 경제적 비용을 요구하고 있으며, 주요 자원 수입 비용의 증가는 우리 일상 생활의 많은 부분에 영향을 미치고 있다. 이러한 비영속적인 기존 자원의 한계를 뛰어넘고, 한편으로는 보다 나은 삶의 질을 추구하는 과정에서 친환경적인 새로운 에너지원을 찾고자 전 사회적인 많은 노력이 이루어지고 있다. 새로운 에너지원에 대한 대안을 제시하기 위한 가장 도전적인 연구가 이루어지고 있는 곳이 바로 ‘핵융합’ 분야라 할 수 있을 것이다.

소위 인공태양을 구현하는 분야라 불리는 핵융합은 원자간의 핵융합 반응을 통한 새로운 원자의 생성 시 질량 결손과정에서 방출되는 에너지를 발전에 이용하고자 하는 것이다. 다만 원자핵 간의 척력을 극복하고서 핵융합반응을 가능케 하기 위해서는 1 억 도씨 이상의 고온의 환경을 필요로 한다. 이를 지구 상에서 구현하기 위하여, 고온의 플라즈마를 자기장으로 밀폐하여 유지시키는 토카막(tokamak)을 이용한 방법이 유력한 방안으로 연구가 이루어지고 있다. 많은 과학적, 기술적 난제들을 극복하기 위하여 국가적인 지원을 토대로 장기적인 연구가 이루어지고 있으며, 기초기술 및 공학기술확보를 위한 국제적인 협력도 활발히 이루어지고 있다. 2020 년대 중반 가동을 목표로 건설되고 있는 국제 핵융합실험로(ITER)는 한국을 포함한 주요 선진기술을 보유한 국가들의 참여로 이루어지고 있으며, 이를 통해 핵융합의 주요 과학적인 난제들을 해결하고자 하고 있다.<sup>(1)</sup> 또한 과학기술적, 공학적인 이슈들을 검증하고 전력생산을 실증하기 위하여 상용플랜트 설계, 구현을 위한 선행 단계에서 실증로 연구도 이루어지고 있다.<sup>(2,3)</sup> 국내에서는 한국형 핵융합실험로(Korean demonstration tokamak reactor, K-DEMO)를 위한 주요 선행개념연구가 현재 진행되고 있다.<sup>(4-7)</sup>

본 연구에서는 K-DEMO의 주요 부품으로 사용될 증식블랑켓(breeding blanket)에 대한 소개와 함께, 핵융합 반응 시 발생하는 중성자가 증식블랑켓의 방사화(radio-activation)에 미치는 영향을 살펴보고자 한다.<sup>(8,9)</sup> 토카막 내에 장착/분리되는 모듈 형태의 증식블랑켓이 방사화됨으로써 야기되는 붕괴열 발생 특성을 평가하고, 유지보수(maintenance) 및 후처리(recycling and disposal) 측면에서 고려되어야 할 인자들을 다뤄보고자 한다. 중요 부품의 유지보수를 위한 hot cell facility의 재원 도출에 붕괴열이 미치는 영향을 살펴보고, 이에 요구되는 열처리 기술에 대해 향후 논의가 이루어질 수 있도록 하고자 한다.



**Fig. 1** Schematic of K-DEMO tokamak. **a** Cut-away view of K-DEMO tokamak.<sup>(6)</sup> **b** Inboard components of the breeding blanket. **c** Outboard components of the breeding blanket. **d** Schematic of 1-dimensional layered model of the breeding blanket.

## 2. 증식블랑켓의 붕괴열 특성 분석

### 2.1 K-DEMO tokamak 의 증식블랑켓

Fig. 1(a)는 K-DEMO 토카막의 모식도를 보여주고 있다. 총 2.2 GW 의 핵융합에너지량(fusion power) 제원을 갖는 K-DEMO 토카막은 상하 대칭 divertor 를 갖는 double null 형태로써, 주 지름 6.8 m 의 도넛 구조로 이루어지고 있다.<sup>(6,10)</sup> 특히 K-DEMO 토카막은 사용될 연료(삼중수소, tritium)의 외부 공급을 최소화하며 열원인 고온 플라즈마를 안정적으로 연속 운용하기 위하여 삼중수소를 자가 공급하는 기능을 요구한다. 이를 위해서는 ‘증식블랑켓’이 필수적으로 사용되어야 한다.<sup>(11)</sup> 증식블랑켓은 플라즈마에서 방출되는 중성자와 블랑켓 내부를 구성하는 물질 간의 반응을 통해 삼중수소 증식(tritium breeding)을 유도하고, 이와 동시에 중성자 증배(neutron multiplication)도 함께 이루어지도록 하는 기능을 수행한다. 즉, 증식블랑켓을 통해서 지속적인 삼중수소 증식을 통한 연료의 공급/연소가 이루어질 수 있어야 한다. Fig. 1(b)와 1(c)는 증식블랑켓 모듈이 장착된 tokamak 내부의 inboard 와 outboard sector 의 구조물을 각각 보여주고 있다.

한편, 증식블랑켓을 통해서 삼중수소의 자가 공급뿐만 아니라, 전력생산을 위해 플라즈마 열원으로부터의 열회수도 이루어지게 된다. 이러한 기능을 위해 증식블랑켓은 Fig. 1(d)에 나타낸 것과 같이, 고열유속 대향의 텅스텐(W) first wall, 가압수 냉각 배관을 포함하는 저방사화합금(reduced activation ferritic martensitic (RAFM) steel) 구조체, RAFM과 W사이의 접착을 위한 바나듐(V), 그리고 삼중수소의 증식과 중성자 증배를 위한 pebble bed layer ( $Li_4SiO_4$ 와  $Be_{12}Ti$  pebble이 혼합된 bed 층)가 RAFM 강 구조체 사이사이에 격납되어 존재한다.<sup>(11)</sup> 증식블랑켓 모듈은 장착된 위치에 따라 상세 치수 정보는 약간씩 상이하며, outboard 중앙에 위치한 증식블랑켓 모듈의 경우 플라즈마 대향 전면부 면적은  $518 \times 1263 \text{ mm}^2$ , 두께는 74.2 mm이다. 이러한 증식블랑켓은 K-DEMO를 구성하는 주요한 in-vessel 요소이며, tokamak의 안정적, 효율적 운영을 위해 수백여 개의 모듈로 구성되어 조립, 분리되는 형태로 유지, 보수가 이루어진다.

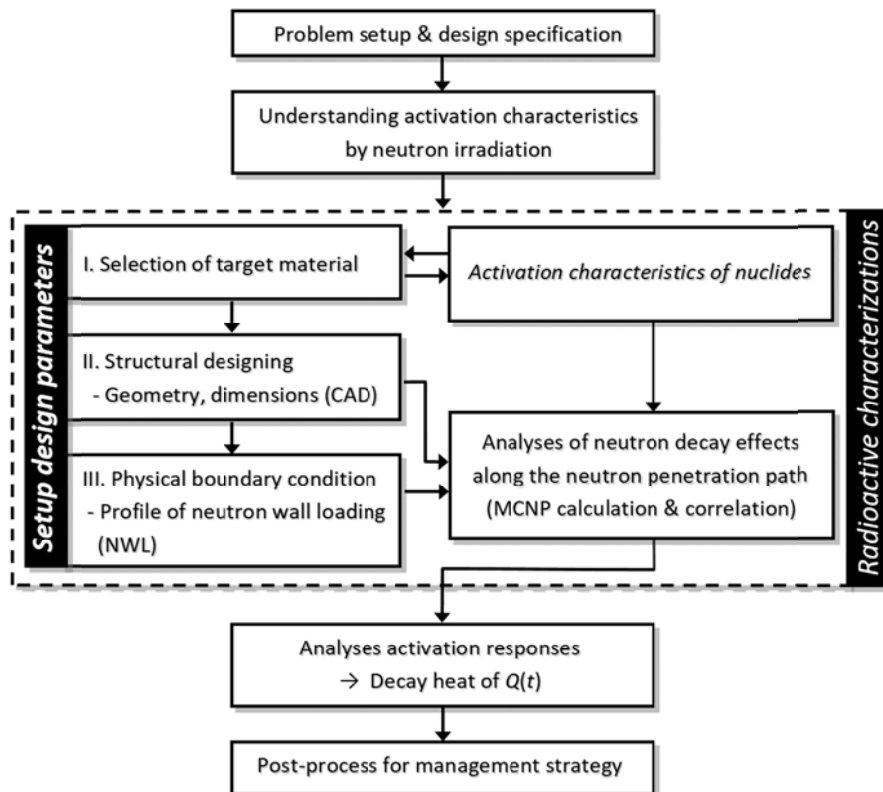


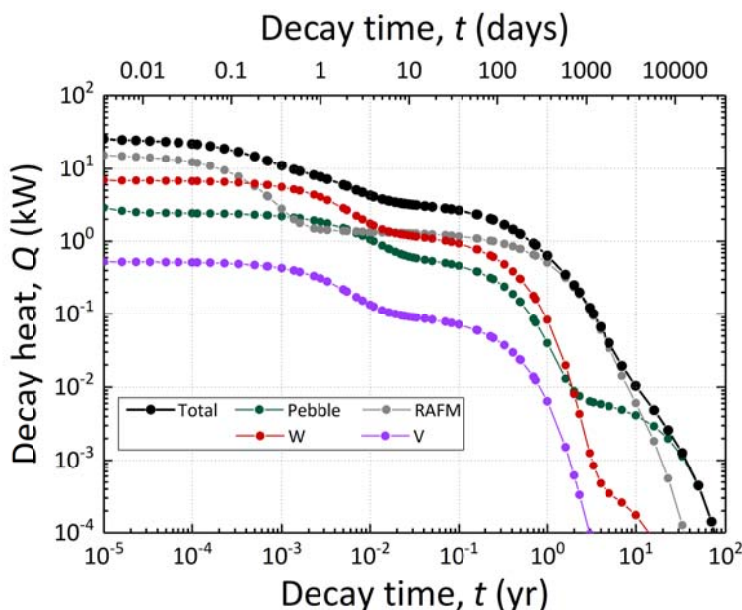
Fig. 2 Evaluation process of the radioactive characteristics on a breeding blanket induced by neutron irradiation

## 2.2 증식블랑켓의 방사화 분석

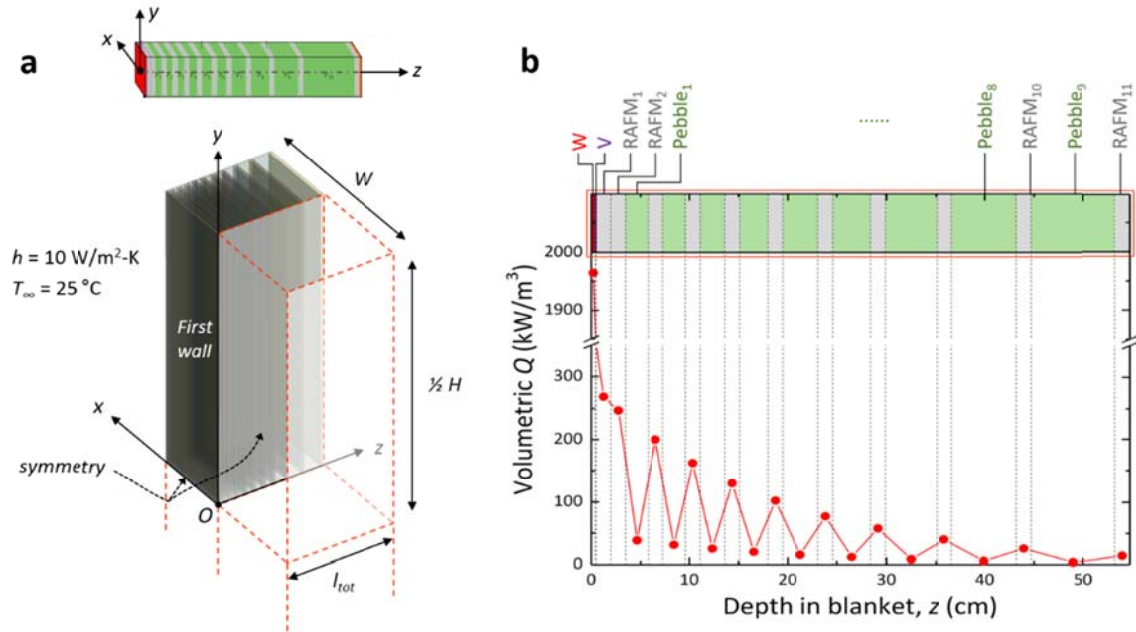
중수소-삼중수소 핵융합 반응 시 발생하는 중성자는 방향성 없이 무작위적으로 거동하며, 대부분의 고체 재질을 투과해 들어가며 주요 원자핵들과 충돌을 일으킨다. 장착된 증식블랑켓을 중성자가 투과해 나가는 과정에서 필연적으로 구조물의 방사화(radio-activation)가 야기된다.<sup>(12)</sup> 특히 플라즈마와 가장 인접한 블랑켓 first wall은 수 MW/m<sup>2</sup>에 달하는 neutron wall loading(NWL)에 노출된다.<sup>(10,13)</sup> 이에 본 연구에서는 중성자 조사에 따른 개별 핵종(nuclides)의 방사화 특성 데이터 라이브러리를 이용하여 대상 블랑켓의 방사화 거동을 평가하였다.<sup>(13-15)</sup> 이 과정에서 증식블랑켓 내부에서 중성자의 거동에 영향을 미치는 블랑켓의 형상, 재질 등을 고려하여 중성자 감쇄(attenuation) 정도를 반영하여야 한다. 이를 위하여 중성자 수송해석 코드(MCNP)를 이용한 별도의 해석을 수행하였으며, 증식블랑켓을 구성하는 각각의 층상 구조물에 입사되는 다양한 에너지 영역 대의 중성자 flux (#/m<sup>2</sup>) 정보를 평가하였다. 각 면의 위치에서 도출된 중성자 거동 정보는 증식블랑켓 내부에서 깊이 방향(Fig. 1d의 z축 방향)으로 감쇄 효과를 외삽하는데 사용된다. 즉, 깊이 방향 좌표의 함수로 표현되는 중성자 감쇄효과 정보를 반영하여 증식블랑켓을 구성하는 각 layer의 위치에 따른 붕괴열 특성을 정량적으로 계산해 낼 수 있다. 증식블랑켓의 구조, 형상, 재료 설계에서부터 방사화 특성 평가에 이르기까지의 일련의 과정을 Fig. 2의 모식도로 설명하였다. Fig. 3은 붕괴시간에 따른 증식블랑켓의 붕괴열 특성을 그 구성 재질별로 재구성한 결과를 보여주고 있다. 구조체로 사용되는 RAFM 강 및 텅스텐 first wall에서는 플라즈마 shutdown 이후임에도 불구하고, 붕괴열로 인한 열 발생량이 초기에는 수십 kW/module에 달하며, 상당시간 지속된다는 것을 확인할 수 있다.<sup>(9)</sup>

## 2.3 증식블랑켓의 붕괴열 특성 및 정상상태 온도 평가

Tokamak 진공용기 내 위치에 따라 여러 형태의 증식블랑켓 모듈이 사용 되는데, outboard의 poloidal 방향으로 중앙에 위치한 증식블랑켓 모듈의 경우 2.89 MW/m<sup>2</sup>에 달하는 매우 높은 neutron wall loading에 노출이 된다.<sup>(16)</sup> 중성자로 인해 야기되는 붕괴열로 인한 온도 상승 효과를 평가해 보기 위하여 해당 모듈에 대한 정상상태 열전달 해석을 수행하였다. 본 해석을 위해서 Fig. 4(a)에 나타낸 바와 같이 outboard 중앙에 위치한 증식블랑켓을 3 차원 형태로 모델링 하였으며, 상온의 공기에 노출된 자연대류 조건으로 외기를 모사하여 평형상태에 다다랐을 경우의 내부 온도 분포를 평가하였다. 평형 상태 온도 평가를 위한 모델링 과정에서 외부 경계조건은 자연 대류로 상정하였으며, 층상형 증식블랑켓을 1/4 대칭(symmetry) 조건으로 모사하였다. 해석에 앞서 결과의 격자의준도를 평가하였으며, 이를 통해



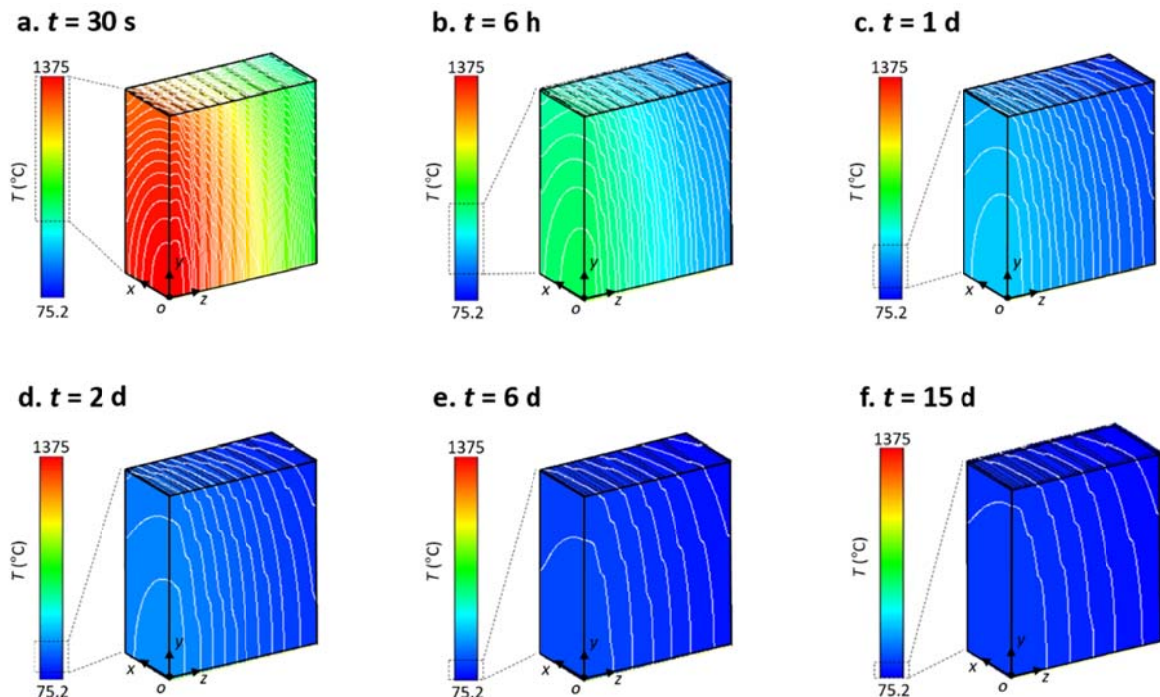
**Fig. 3** Decay heat generation from a module of the breeding blanket located at the center of the outboard section in the K-DEMO tokamak. The neutron wall loading onto W-first wall is about 2.89 MW/m<sup>2</sup>



**Fig. 4** Heat transfer analysis for the breeding blanket module. **a** Schematic of a layered-type module of breeding blanket and its 3-D geometry with boundary conditions applied to heat transfer analyses. A red-colored plane indicates a W-first wall exposed to neutron irradiation. **b** Volumetric heat generation induced by the decay heat immediately after the plasma shutdown ( $t=30 \text{ s}$ )

최소 190 만개 이상의 정렬 격자(structured mesh)가 사용되도록 하였다. 본 연구에서의 열해석은 상용 CFD 코드인 ANSYS Fluent 18.0 (ANSYS Inc.)을 통해 이루어졌으며, 모델링 및 격자 생성은 Design modeler (ANSYS Inc.)을 통해 이루어졌다. 해석은 Fourier's law of cooling 및 에너지 보존을 고려하였으며, 다루어진 지배방정식은 아래의 식 (1)과 같다.<sup>(17)</sup>

$$\nabla \cdot (-k\nabla T) = \dot{Q} \quad (1)$$



**Fig. 5** Local temperature distributions of the breeding blanket with isothermal lines as cooling time ( $t$ ) increases.

여기서  $k$  는 열전도도,  $T$  는 온도,  $\dot{Q}$  는 생성되는 붕괴열을 의미한다. 블랑켓 내부 각 구성 층으로부터 발생하는 붕괴열은 각 재질 별로 분석한 붕괴열 정보를 토대로 해당 모듈의 형상과 치수, layer 위치를 고려하여 시간에 따른 함수로써 단위 체적 당 열량으로 도출할 수 있다. Outboard 중앙에 위치한 증식블랑켓의 내부에서 발생하는 단위 체적당 붕괴열 분포를 Fig. 4(b)에 나타내었다.

Figure 5 는 증식블랑켓 내부에서 시간에 따라 변화하는 붕괴열을 고려하여 도출된 정상상태 온도분포 결과를 보여주고 있다. 플라즈마 운용 직후( $t=30$  초), 자연대류 외 별도의 냉각이 적용되지 않은 조건에서는 높은 붕괴열로 인해 증식블랑켓 내부에서 국소적으로 온도가 최대  $1300^{\circ}\text{C}$  를 상회할 수 있다는 점을 확인할 수 있다. 이후 붕괴 시간의 증가에 따라 온도가 크게 떨어지는 것을 확인할 수 있으며, 대략 15 일 정도의 자연 냉각기를 거치게 되면 전체적인 온도가  $100^{\circ}\text{C}$  이하로 안정화하는 결과를 보여주고 있다. 붕괴열 특성을 고려한 증식블랑켓의 정상상태 온도를 평가해 본 결과를 토대로, 플라즈마 운용 직후 별도의 냉각을 통해 온도 상승을 방지해야 할 필요성을 확인할 수 있다. 또한 시간에 따른 붕괴열 생성 결과를 보다 세밀하게 분석해 봄으로써, 적절한 냉각 기법의 설계는 물론이고 토카막으로부터 부품의 분리, 이송과 관련된 유지/보수 시나리오를 마련하는 중요한 정보를 도출할 수 있을 것이다.<sup>(18,19)</sup> 향후 실증로 및 핵융합플랜트 설계의 측면에서 각 구성요소의 방사화로 인한 붕괴열 발생 특성을 평가할 필요가 있으며, 이에 따른 부품의 온도 상승을 예측함으로써 후처리과정에 소요되는 주요 유지/보수 전략 수립의 기본적인 열설계 기준을 마련해야 할 것이다. 토카막을 비롯하여 전반적인 핵융합 플랜트의 운영과정에서 발생하는 폐기물의 보관, 운용 후 처리(recycling and disposal), 관리에 대한 적절한 열처리/냉각 방안은 물론 안전성평가연구(safety analysis) 등의 공학적인 측면에서 많은 부분이 심도 있게 진행되어야 할 것이다.<sup>(9,12)</sup>

### 3. 결 론

한국형 핵융합실증로(K-DEMO)에 사용될 증식블랑켓 모듈은 삼중수소의 증식과 중성자 증배를 가능케 하는 기능을 필요로 한다. 특히 고온의 플라즈마에서 중수소-삼중수소 핵융합 반응에 의해 발생하는 중성자는 증식블랑켓 모듈의 방사화를 필연적으로 야기하며, 유지/보수 과정에서 상당한 양의 붕괴열을 지속하여 발생시키게 된다. 특히 증식블랑켓의 구조체 재질로 사용되는 RAFM 강과 first wall 로 사용되는 텅스텐 층의 경우 수십 kW/module 에 달하는 붕괴열 특성을 보이며, 장시간 그 특성이 유지되는 것을 확인할 수 있다. 방사화된 증식블랑켓으로부터 발생하는 붕괴열 특성을 고려하였을 때, 토카막의 운용과 주요 부품의 유지, 보수, 폐기 과정에 요구되는 주요 설비의 설계 측면에서 적절한 열처리 기술의 필요성을 고려해야 할 것이다. 이에 본 연구에서는 선행연구로써 K-DEMO 에 적용될 증식형 증식블랑켓 모듈에 대해 정상상태 열전달 해석을 통해 평형상태 온도 분포와 자연냉각 기간이 열특성에 미치는 영향을 살펴보았다. 본 연구에서 도출된 결과와 분석자료는 향후 주요 방사화된 부품의 후처리 과정에서 요구되는 열처리 방안 마련에 유용한 자료로 활용될 것이며, 이를 토대로 hot cell 설계 및 주요 유지보수 시나리오의 개념설계, 안전성 평가 등의 추가적인 연구를 지속하고자 한다.

### 후 기

이 논문은 2019년도 정부(과학기술정보통신부) 출연 재원으로 국가핵융합연구소 핵융합 실증플랜트 설계개념 및 기반기술 연구(CN1901)의 지원을 받아 수행된 연구임.

### 참고문헌 (References)

- (1) Bigot, B., 2015, "Pull Together for Fusion," *Nature*, Vol. 522, No. 7555, pp. 149~151.
- (2) Federici, G., Bachmann, C., Biel, W., Boccaccini, L., Cisondi, F., Ciattaglia, S., Coleman, M., Day, C., Diegele, E., Franke, T., Grattarola, M., Hurlzmeier, H., Ibarra, A., Loving, A., Maviglia, F., Meszaros, B., Morlock, C., Rieth, M., Shannon, M., Taylor, N., Tran, M. Q., You, J. H., Wenninger, R. and Zani, L., 2016, "Overview of The Design

- Approach and Prioritization of R&D Activities Towards An EU DEMO," *Fusion Eng. Des.*, Vol. 109~111, pp. 1464~1474.
- (3) Tanaka, S. and Takatsu, H., 2008, "Japanese Perspective of Fusion Nuclear Technology from ITER to DEMO," *Fusion Eng. Des.*, Vol. 83, No. 7, pp. 865~869.
- (4) Kim, K., Kim, H. C., Oh, S., Lee, Y. S., Yeom, J. H., Im, K., Lee, G.-S., Neilson, G., Kessel, C., Brown, T. and Titus, P., 2013, "A Preliminary Conceptual Design Study for Korean Fusion DEMO Reactor," *Fusion Eng. Des.*, Vol. 88, No. 6~8, pp. 488~491.
- (5) Im, K., Park, J. S., Kwon, S., Kim, K., Kessel, C., Brown, T. and Neilson, G., 2014, "Design Concept of K-DEMO In-vessel Components," *25th IAEA Fusion Energy Conference - IAEA CN-221*.
- (6) Kim, K., Im, K., Kim, H. C., Oh, S., Park, J. S., Kwon, S., Lee, Y. S., Yeom, J. H., Lee, C., Lee, G. S., Neilson, G., Kessel, C., Brown, T., Titus, P., Mikkelsen, D. and Zhai, Y., 2015, "Design Concept of K-DEMO for Near-term Implementation," *Nuclear Fusion*, Vol. 55, No. 5, 053027.
- (7) Im, K., Park, J. S. and Kwon, S., 2015, "Development of the K-DEMO Divertor Concept," *2015 IEEE 26th Symposium on Fusion Engineering (SOFE)*.
- (8) Abdou, M., Morley, N. B., Smolentsev, S., Ying, A., Malang, S., Rowcliffe, A. and Ulrickson, M., 2015, "Blanket/fist wall Challenges and Required R&D on the Pathway to DEMO," *Fusion Eng. Des.*, Vol. 100, pp. 2~43.
- (9) Kim, B. S., Kim, H. T., Kwon, S., Park, J. S. and Im, K., 2017, "Characterization of Decay Heat of K-DEMO Breeding Blanket Components Induced by Neutron Irradiation and Its Thermal Management," *Proceedings of the Korean Society of Mechanical Engineering (KSME) Annual Winter Conference*.
- (10) Im, K., Kwon, S. and Park, J. S., 2016, "A Preliminary Development of the K-DEMO Divertor Concept," *IEEE Trans. Plasma Sci.*, Vol. 44, No. 10, pp. 2493~2501.
- (11) Park, J. S., Kwon, S., Im, K., Kim, K., Brown, T. and Neilson, G., 2015, "Pre-conceptual Design Study on K-DEMO Ceramic Breeder Blanket," *Fusion Eng. Des.*, Vol. 100, pp. 159~165.
- (12) Someya, Y., Tobita, K., Utoh, H., Asakura, N., Sakamoto, Y., Hoshino, K., Nakamura, M. and Tokunaga, S., 2015, "Management Strategy for Radioactive Waste in the Fusion DEMO Reactor," *Fusion Sci. Technol.*, Vol. 68, No. 2, pp. 423~427.
- (13) Gilbert, M. R. and Sublet, J. C., 2017, "Scoping of Material Response under DEMO Neutron Irradiation: Comparison with Fission and Influence of Nuclear Library Selection," *Fusion Eng. Des.*, Vol. 125, pp. 299~306.
- (14) Gilbert, M. R., Sublet, J. C. and Forrest, R. A., 2015, *Handbook of Activation, Transmutation, and Radiation Damage Properties of the Elements Simulated Using FISPACT-II & TENDL-2014; Magnetic Fusion Plants*, CCFE-R (15) 26.
- (15) Pereslavitsev, P., Lu, L., Fischer, U. and Bitz, O., 2014, "Neutronic Analyses of the HCPB DEMO Reactor Using a Consistent Integral Approach," *Fusion Eng. Des.*, Vol. 89, No. 9, pp. 1979~1983.
- (16) Im, K., 2017, *The Plasma Radiation Heat Load and Neutron Wall Loading on the In-Vessel Component First Wall*, K-DEMO Internal Document TN\_001\_2017-In-vessel-001-v03, Nuclear Fusion Research Institute.
- (17) Incropera, F. P., 2007, *Fundamentals of heat and mass transfer*, John Wiley: Hoboken, NJ.
- (18) Someya, Y., Tobita, K., Yanagihara, S., Kondo, M., Utoh, H., Asakura, N., Hoshino, K., Nakamura, M. and Sakamoto, Y., 2014, "Waste Management Scenario in the Hot Cell and Waste Storage for DEMO," *Fusion Eng. Des.*, Vol. 89, No. 9, pp. 2033~2037.
- (19) Thomas, J., Loving, A., Bachmann, C. and Harman, J., 2013, "DEMO Hot Cell and Ex-vessel Remote Handling," *Fusion Eng. Des.*, Vol. 88, No. 9, pp. 2123~2127.