



교토대학교 임계집합체에서의 한국 학부생들을 위한 국제 원자력 교육 프로그램



변 철 호

일본 교토대학교 원자로실험소 교수

머리글



임계집합체(critical assembly)는 원자로물리학 분야에서 목업(mock-up) 실험과 벤치마킹 실험을 위해 사용되는 원자력 시설이다. 이것은 또한 원자력공학 및 기술 관련 교육을 위한 특히 학생들과 엔지니어들이 원자로 실험과 실제 작동을 통해 원자로의 기본 개념을 이해하기 위한 가장 효과적인 시설 중의 하나이다.

최근 원자로 조종을 위한 원자로 가상 시뮬레이터 시스템은 컴퓨팅 기술의 급격한 발전으로 의하여 현실과 대단히 유사한 상황 및 기능을 제공하기 때문에 원자력발전소에서 근무하는 대부분의 원자로 전문가들은 이 시뮬레이터를 통해 훈련을 받고 있으며, 이러한 방법은 원자로를 안전하게 운영하는 데 많은 도움이 되고 있다.

하지만, 실제 원자로에서 진행되는 실험은 가상의 시뮬레이터 시스템으로는 부족한 원자로 그 자체를 이해하는 데 보다 큰 도움이 되며, 또한, 임계집합체에서의 실험은 원자력공학을 전공하는 학생들과 엔지니어들에게 원자로 시설 및 핵물질 취급과 관련된 안전 규정을 이해할 수 있는 소중한 기회를 제공한다.

교토대학교 임계집합체(KUCA : Kyoto University Critical Assembly)에서 일본 학생들을 위해 진행되는 원자로-실습 코스(Ⅰ-Ⅳ)는 1975년에 시작하였으며, 그 이후로 임계 접근, 제어봉 교정, 중성자 및 출력 보정 측정, 파인만 및 펄스 중성자법(Feynman- and pulsed neutron methods)을 사용한 미임계 측정, 원자로 작동 교육과 같은 원자로물리학과 관련된 다양한 실험이 진행되고 있다.

이러한 실험은 고농축 우라늄과 알루미늄(Al) 합금으로 구성된 판형

재일교포 2세
일본 나고야(名古屋)대 원자핵공학과
학사, 석사
일본 교토(京都)대 원자핵공학과
박사
일본 산업기술종합연구소(AIST) 특
별연구원

〈표 1〉 한국 소재 대학교의 KUGSiKUCA 프로그램 참가자 수

대학교 (주관년도 순)	회계년도							
	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	총
경희대학교	6	3	3	3	3	2	3	23
한양대학교	2	3	3	3	3	2	3	19
조선대학교	2	3	3	4	3	4	2	21
서울대학교	-	2	2	4	7	4	3	22
제주대학교	2	3	2	3	3	5	2	20
한국과학기술원	1	1	2	1	3	2	2	12
총	13	15	15	18	22	19	15	117

연료를 사용하는 물감속 및 반사 코어(water-moderated- and -reflected- core)인 KUCA C-코어에서 실시하고 있다.

1975년부터 2010 회계년도까지 35년 동안, 일본 전역에서 3,000명 이상의 학부생과 대학원생들이 이 코스에 참가하였으며, 교토대학교 원자로실험소(KURRI, Kyoto University Research Reactor Institute)의 국제 교류 프로그램의 일환으로, 교토대학교 임계로(KUGSiKUCA Korean Under Graduate Students in Kyoto University Critical Assembly) 프로그램^{[14]-[16]}을 통해 동일한 코스를 한국의 학부생들에게 제공하는 프로그램이 2003년부터 시작하였다.

이 프로그램은 경희대학교 공과대학 원자력공학과에서 처음 시작하였으며, 원자력 인력 양성 프로그램의 일환으로서 한국 정부의 과학기술부(현재 교육과학기술부)가 지원하였고, 경희대학교의 제안에 따라 2003년 7월 경희대학교와 KURRI 사이의 학술 협력 및 교류를 위한 양해각서를 체결하였다.

2003년경 한국의 어떠한 단일 대학도 자체적인 연구용 및 교육용 원자로를 보유하기가 상당히 힘들다는 사실에 근거하여 이 프로그램이 시작하였지만, 2008년에는 경희대학교가 연구용 원자로(AGN-201K)를 개조한 후 연구용 및 교육용 원자로로 사용

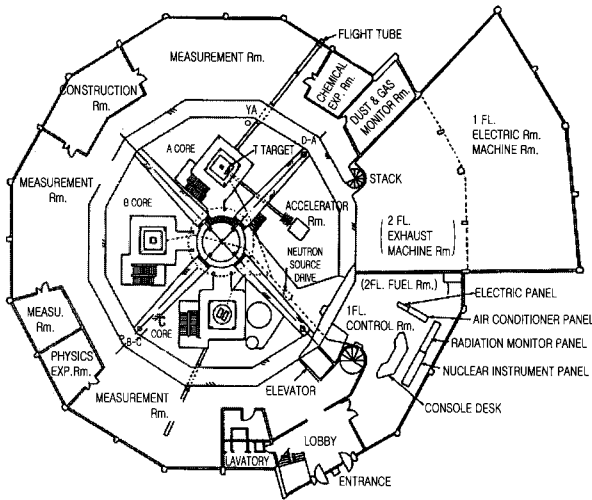
하기에 이르러 본 프로그램은 2009년을 마지막으로 종료하게 되었다.

하지만 KUCA 건설의 핵심적인 목표 중의 하나인 원자로물리학을 공부하는 일본 학생들을 위한 실험 연수 코스를 설립하는 것을 뛰어넘어, 이를 국제적으로 확대하여 일본 학생뿐만 아니라 타국의 학생들을 위한 실험 연수를 제공한 점은 큰 의의가 있다고 할 수 있다.

KUGSiKUCA 프로그램을 간단히 정리하면, 2003년부터 2009년까지 한국의 경희대학교, 한양대학교, 조선대학교, 서울대학교, 제주대학교, 및 한국과학기술원(KAIST)에서 원자력공학을 전공하는 총 117명의 한국 학부생들이 이 프로그램에 참여하였으며, 한국에서 온 2명의 교수와 한 명의 조교가 학생들을 지도하고, 실험 및 리포트, 토의 수업을 감독하였다.〈표 1〉 이 기간 그들이 기울인 노력은 한국과 일본 양국 간의 협력에 기반을 둔 효율적이고 특별한 코스를 제공하는 이 프로그램의 성공에 상당히 기여하였다.

이 프로그램의 추가적인 성과로는, 2010년 4월 교토대학교 출판부가 KUGSiKUCA 프로그램에서 사용된 영어로 작성된 강의, 실험, 토의 수업 및 리포트 자료와 일본어 코스 자료를 사용하여 출판한 영어 교과서^[17]를 들 수 있다.

또한 KUGSiKUCA 프로그램은 2010년 3월 동국



〈그림 1〉 KUCA 건물의 횡단면도

대학교에서 이 출판된 영어 교과서를 한국어로 번역하여 교과서[18]로 출판하는 또 다른 중요한 공헌을 세우기도 하였다.

KUCA 시설

멀티 코어형 임계집합체 (multi-core-type critical assembly)인 KUCA는 1974년 일본의 모든 대학교의 연구원들이 진행하는 원자로물리학 공동 연구를 위한 시설로 설립되었으며, A, [19]-[24] B[19]-[25]-[29], C 세 개의 독립된 코어로 이루어져 있다. (〈그림 1〉)

A-와 B-코어에는 고체 폴리에틸렌과 흑연 중성자 감속재를 사용하였으며, C-코어에는 경수를 사용하였다. (〈그림 2〉)

하지만 임계로가 하나의 제어 메커니즘만을 사용하도록 설계되었기 때문에, KUCA에서는 오직 한 번에 하나의 코어만 임계 상태로 만들 수 있다.

93% 고농축 우라늄 연료에는 A-와 B-코어를 위한 얇은 금속으로 코팅한 2" 넓이, 1/16" 두께의 쿠펜형 연료판 (coupon-type fuel plate)과 C-코어를 위한 0.5mm 두께로 알루미늄(Al)을 입힌 넓이 60×600mm², 두께 1.5mm 판형의 두 가지 종류가 있다.

또한, C-코어는 32가지 다양한 종류의 굴곡과 넓이를 가지며, 0.45mm 두께의 알루미늄으로 코팅된

길이 650mm, 두께 1.4mm의 연료판에 각각 93% 및 45% 농축도의 우라늄이 장전된 두 가지 종류의 핵연료가 추가적으로 존재한다.

A-와 B-코어에서는 넓이 55.3mm² (내부 치수), 두께 1.5mm, 높이 약 1,500mm의 Al의 피 (sheath)에 넓이 2" 2와 다양한 두께의 다양한 물질로 만든 판을 쌓아 핵연료체 (fuel element) 또는 반사체 (reflector element)를 조립하며, 임계집합체를 구성하기 위해 위의 핵연료체 및 반사체 등의 요소들을 격자판 위에 수직으로 배열한다.

① 핵연료체의 연료와 감속재 (moderator) 판의 구성 및 ② 연료부의 단위 셀에 있는 감속재 판의 두께와 연료판의 수를 변경하여 다양한 중성자 스펙트럼을 발생시킬 수 있으며, 이러한 임계로의 특성을 이용하여 토륨 (Th)을 장착한 코어, 임계 안전성, 좁은 간격 격자 코어 (tight pitch lattice core) 등에 대해 원자로물리 연구가 진행되고 있다.

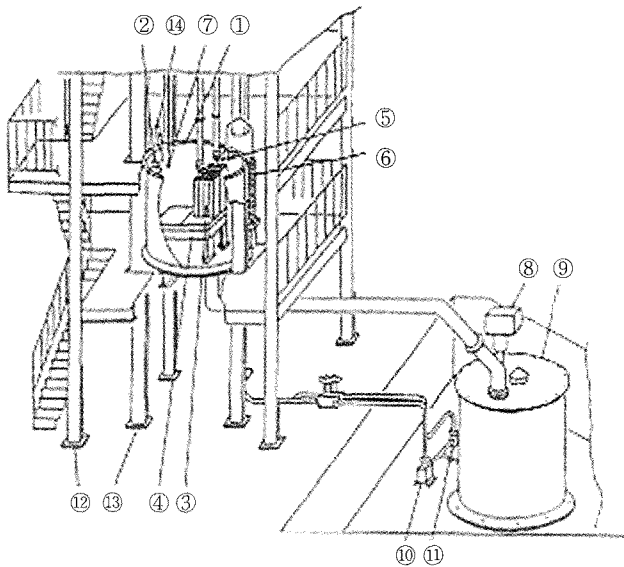
C-코어에서는 코어부의 중성자 스펙트럼을 변경하기 위해 핵연료판의 간격을 세 가지로 조절할 수 있다. 각각 약 3.0, 3.5, 4.5mm 간격의 홈을 갖는 연료 프레임의 두 Al 구조체 사이에 연료판을 하나씩 수직으로 삽입하여 각기 다른 중성자 스펙트럼을 갖는 연료체를 조립한 후, 이러한 연료체들을 Al 코어 탱크 안의 격자판에 위에 배열함으로써 C-코어의 노심을 구성하고, 감속재 및 반사체인 경수를 Al 코어 탱크에 주입 함으로써 임계로를 구성한다.

이러한 특징을 바탕으로 C-코어에서는 결합 코어 (coupled core), 농도를 감소시킨 우라늄 연료의 연구용 원자로 코어, 임계 안전성 및 원자로 안전 특성에 대한 원자로물리학 연구가 진행되고 있다.

Al 피복 (cladding)을 사용한 판형 연료의 취급이 금속 코팅을 사용한 쿠펜형 연료 처리보다 더 쉽고 안전하기 때문에 이 코어를 교육 코스에서 사용하고 있다.

원자로 물리학 실험

코스 실험을 실시하기 전에, 교도대학교 교수들이



- 1 Core tank
2. Handle for the coreseparation mechanism
3. Core assembly
4. Core separation mechanism
5. Float switch to detect the core overflow
6. Overflow tube
7. Water level switch
8. Dump valve
9. Dump tank
10. High-flow feed pump
11. Low-flow feed pump
12. Supporting structure of the scaffold
13. Supporting structure of the core tank
14. Water feed tank for precision control

〈그림 2〉 KUCA 경수 감속 코어(C-코어)의 전체 구조

한국을 방문하여 한국의 학생들에게 C-코어에서의 원자로물리학 실험에 대한 사전 기초 강의를 영어로 제공하였으며, 실험을 충분히 이해하고 KUCA에 도착할 때 예비 리포트를 제출할 수 있도록 세 가지 관련 과제를 지정하였다.

KUCA에 머무르는 10일 동안, 학생들은 먼저 KURRI 실험 계획안에 근거하여 작업자 및 원자로 운전자로서 방사선 보호와 관련된 안전 규정 및 보안 교육에 대한 강의에 참석하였다. 그들은 또한 연구의 세 가지 주제와 관련된 기술 강의에도 참여하였다.

확하게 이해해야 한다.

노심에는 임계 접근 실험을 위하여 3개의 제어봉(control rod)을 사용하여 노심의 임계도를 변경시키며, 원자로 안전 정지를 위하여 추가적으로 3개의 안전봉(safety rod)이 설치되어 있다.

노심 상태의 계측을 위해서는 세 가지 핵분열함(fission chamber, FC)과 세 가지 비보상 이온 전리함(uncompensated ionization chamber, UIC)을 사용하였다.

1. 임계 접근(Approach to criticality)

임계 접근은 원자로 연구에서 가장 기본적인 단계이다. 실험 장치로서 임계집합체의 준비와 조정은 임계 접근을 통해 완성된다.

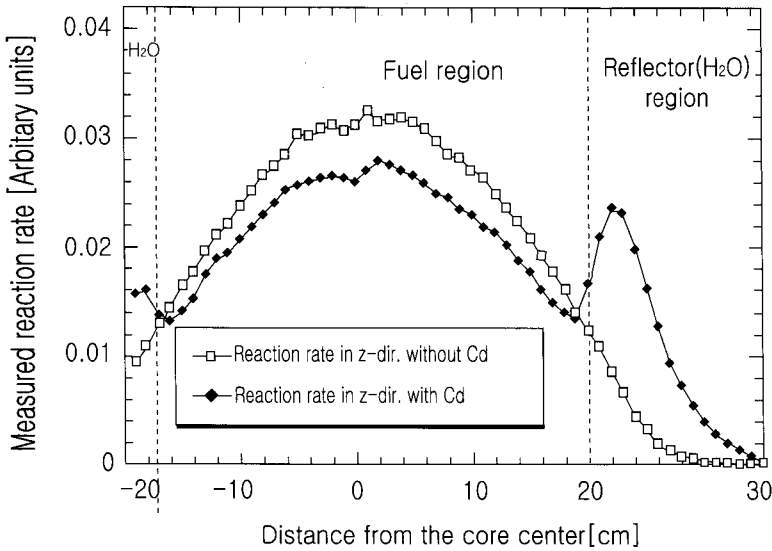
원자로에 처음으로 핵연료를 탑재할 때, 원자로를 임계 상태로 만드는데 필요한 연료의 양을 아주 정확하게 계산하기는 힘들다. 계산을 통한 임계 질량(critical mass) 예상은 연료를 안전하게 탑재하기 위한 필수적인 과정이지만, 예측한 임계 질량과 측정된 임계 질량을 비교하므로 원자로의 물리적인 특성과 계산 방법 및 핵 데이터의 유효성에 대해서도 정

2. 제어봉 교정(Control rod calibration)

원자로에서의 다양한 반응도 효과는 임계 상태를 유지하기 위해 제어봉으로 일정한 반응도를 보정하여 일반적으로 측정한다.

따라서 제어봉 교정(제어봉의 이동 단위 당 반응도 값의 측정)은 원자로에서 다른 섭동(perturbation)에 의해 발생한 반응도 변화를 측정하기 위한 반응도 기준으로 사용될 때 필수적이다.

운전자는 (원자로 운전을 위해서도 중요한) 제어봉 교정 데이터를 사용하여, 제어봉 이동으로 발생한 반응도를 예상하고 원자로를 안전하게 운전한다. 또한 잉여 반응도와 원자로 정지 한계의 측정은 안전한 원자로 작



〈그림 3〉 z축에서 ^{197}Au 선에 의한 측정 반응을

동을 위한 가장 엄격한 조건 중의 하나이다.

따라서 새로 건설한 코어의 제어봉 보정은 임계 접근 후에 그리고 다른 실험을 실행하기 전에 즉시 실행해야 할 가장 중요한 작업이다.

3. 반응을 측정과 원자로 출력 교정

(Measurement of reaction rates and reactor power calibration)

열 중성자로 (thermal reactor)를 일정한 출력으로 작동할 때, 열 중성자 속 (thermal neutron flux)은 원자로 특성에 의해 결정되는 독특한 분포를 형성한다.

이 속 분포 (flux distribution)의 크기는 원자로 출력에 비례하기 때문에, 원자로 출력은 원자로 내의 상대속 분포(〈그림 3〉)와 원자로 코어 내부의 특정한 위치에서 절대 중성자 속 값을 측정하여 계산한다.

이온 전리함과 핵분열함으로 이루어져 있는 중성자 검출기와 비교하여, 포화 방사능을 통해 중성자를 측정하는 방사화 방법은 선(ray)에 민감하지 않으며, 큰 크기의 검출기가 사용할 수 없는 위치에서도 사용할 수 있는 장점을 갖고 있다.

4. 이례적인 특전

세 가지 주요 실험에 더하여, 교육 프로그램에 참석한 학생들은 모두 원자로 자체를 운전하는 실습 및

고농축 핵연료를 이용하여 핵연료 집합체를 손으로 직접 제작하고 이를 원자로에 탑재하는 경험을 했다.

그들은 또한 원자로의 긴급 정지 시스템(SCRAM 또는 TRIP)을 경험하고, KURRI에서 근무하는 임계 안전성 및 방사능생명과학 분야의 저명한 교수들이 제공하는 몇 가지 강의에 참석했으며, 한국의 다른 대학교에서 온 학생들과 실험과 관련된 여러 가지 주제에 대해서 토론했다.

이 프로그램의 마지막 단계에서, 학생들은 미하마에 있는 일본 간사이전력(KEPCO)의 가압수형원자로, 일본 원자력에너지기구(JAEA; 구 일본핵연료사이클기구(JNC))의 몬주 건설 사무소에 있는 고속증식형원자로, 핵연료공업주식회사(NFI)의 쿠모토리공장, 핵안전시스템협회(INSS) 및 핵융합연구소(NIFS)를 포함하여 일본의 원자력 시설들을 견학했다.

맺는 말

한국의 학부생들을 위한 원자로 실험 코스는 일본 KUCA에서 성공적으로 진행되었으며, 한국에 있는 6개의 대학교에서 원자력공학을 전공하는 총 117명의 학부생들이 이 코스에 참여하였다.

이 코스는 한국과 일본 모두에 큰 도전이었음에도 불구하고, 실험을 통한 원자력 교육과 국제 교류를 통해 한국과 일본의 학생들과 교수들 모두는 많은 성과와 가치있는 경험을 얻을 수 있었다.

특히 이 코스에 참여한 학생들 중 많은 수는 한국에서 원자력공학 분야에서 근무하고 있으며, 해외에서 원자력공학을 공부하고, 정부, 산업계 및 학술 연구소에서 자신의 전문적인 진로를 추구하고 있는 점에서 본 교육 프로그램의 의의를 찾을 수 있다.

이러한 경험을 바탕으로 원자로물리학 교육과 KURRI의 국제 협력 프로그램을 국제적으로 장려하기 위해 앞으로 다른 나라들에서 온 학생들을 대상으로 한 새로운 원자로실험소 코스를 시작할 수 있을

것이다.

* 감사의 말

필자는 경희대학교의 김명현 교수, 황주호 교수, 신명원 박사, 윤석균 씨, 최근석 씨, 한양대학교의 김찬형 교수와 김재천 박사, 조선대학교의 이경진 교수와 김대석 씨, 서울대학교의 주한규 교수와 이동욱 씨, 제주대학교의 김신 교수와 이정성 씨, KAIST의 최성민 교수에게 이 코스를 위해 그들이 보내준 관대하고 유용한 지원에 대해 감사의 말을 전합니다.

또한 한국 학생들의 산업 시찰을 허락해 준 KEPCO의 미하마 원자력발전소, JAEA(구 JNC)의 문주 건설사무소, NFI의 구마토리공장, INSS 및 NIFS에도 감사의 말을 전합니다. ☸

<참고 자료>

[1] K. Nishina, "Experience of Joint Reactor Laboratory Course with KUCA," J. the Atomic Energy Society of Japan, 24, 865 (1982). [in Japanese]

[2] H. Nishihara, S. Shiroya and K. Kanda, "Reactor Laboratory Course for Students Majoring in Nuclear Engineering with the Kyoto University Critical Assembly (KUCA)," Proc. 10th Pacific Basin Nucl. Conf. (10PBNC), Kobe, Japan, Oct. 20-25, p 984-993(1996).

[3] T. Misawa, K. Kobayashi, C. Ichihara et al., "Reactor Laboratory Course for Students with the Kyoto University Critical Assembly (KUCA)," Proc. Int. Conf. on New Frontiers of Nucl. Technol.: Reactor Physics, Safety and High-Performance Computing (PHYSOR2002), Seoul, Korea, Oct. 7-10, 9E-28, (2002).

[4] T. Misawa, H. Unesaki, C. Ichihara et al., "Reactor Laboratory Course Students using Kyoto University Critical Assembly (KUCA)," Proc. 16th Pacific Basin Nucl. Conf. (16PBNC), Aomori, Japan, Oct. 13-18, P1310 (2008).

[5] M. Mori, S. Shiroya and K. Kanda, "Temperature Coefficient of Reactivity in Light-Water Moderated and Reflected Cores Loaded with Highly-Enriched-Uranium Fuel," J. Nucl. Sci. Technol., 24, 653 (1987).

[6] S. Shiroya, K. Kanda and K. Tsuchihashi, "Analyses of Reactor Physics Experiments in the Kyoto University Critical Assembly," Nucl. Sci. Eng., 100, 525 (1988).

[7] T. Misawa, S. Shiroya and K. Kanda, "Study on Criticality of A Light Water Moderated and Reflected Coupled Core with Highly Enriched Uranium Fuel," Nucl. Technol., 83, 162 (1988).

[8] T. Misawa, S. Shiroya and K. Kanda, "Measurement of Prompt Neutron Decay Constant and Large Subcriticality by the Feynman-a Method," Nucl. Sci. Eng., 104, 53 (1990).

[9] Y. Kitamura, M. Matoba, T. Misawa et al., "Reactor Noise Experiments by Using Acquisition System for Time Series Data of Pulse Train," J. Nucl. Sci. Technol., 36, 653 (1999).

[10] K. Hashimoto, T. Sano, H. Unesaki et al., "Rapid Estimation of Core-Power Ratio in Coupled-Core System by Rod Drop Method," J. Nucl. Sci. Technol., 37, 565 (2000).

[11] C. H. Pyeon, T. Misawa, S. Shiroya and Y. Yamane, "Relationship between Flux tilt in Two-Energy-Group and Eigenvalue Separation," Ann. Nucl. Energy, 28, 1625 (2001).

[12] T. Kitada and T. Takeda, "Evaluation of Eigenvalue Separation by the Monte Carlo Method," J. Nucl. Sci. Technol., 39, 129 (2002).

[13] C. H. Pyeon, T. Misawa, H. Unesaki and S. Shiroya, "Experiments and Analyses for Relationship between Flux tilt in Two-Energy-Group Model and Eigenvalue Separation," J. Nucl. Sci. Technol., 41, 171 (2004).

[14] C. H. Pyeon T. Misawa, H. Unesaki et al., "Korean Under-Graduate Students in Kyoto University Critical Assembly Program (KUGSiKUCA



Program),” Proc. 2004 Ann. Mtg. the Atomic Energy Society of Japan, Okayama, Japan, Mar. 29–31, G26, (2004). [in Japanese]

[15] C. H. Pyeon, T. Misawa, H. Unesaki et al., “Reactor Laboratory Course for Korean Under-Graduate Students in Kyoto University Critical Assembly (KUGSiKUCA),” Proc. Int. Sympo. Research Reactor and Nucl. Sci., (HANARO2005), Daejeon, Korea, Apr. 11–14, (2005).

[16] C. H. Pyeon T. Misawa, H. Unesaki et al., “Reactor Physics Experiments by Korean Under-Graduate Students in Kyoto University Critical Assembly Program (KUGSiKUCA Program),” Proc. 2006 Fall Mtg. Korean Nuclear Society, Gyeongju, Korea, Nov. 2–3, (2006).

[17] T. Misawa, H. Unesaki and C. H. Pyeon, Nuclear Reactor Physics Experiments, Kyoto University Press, Kyoto, Japan, (2010).

[18] J. H. Moon, S. Kim, G. T. Kim and C. H. Pyeon, Nuclear Reactor Physics Experiments, Dongguk University, Gyeongju, Korea, (2010). [in Korean]

[19] C. H. Pyeon, Y. Hirano, T. Misawa et al., “Preliminary Experiments for Accelerator Driven Subcritical Reactor with Pulsed Neutron Generator in Kyoto University Critical Assembly,” J. Nucl. Sci. Technol., 44, 1368 (2007).

[20] C. H. Pyeon, M. Hervault, T. Misawa et al., “Static and Kinetic Experiments on Accelerator-Driven System with 14 MeV Neutrons in Kyoto University Critical Assembly,” J. Nucl. Sci. Technol., 45, 1171 (2008).

[21] C. H. Pyeon, H. Shiga, T. Misawa et al., “Reaction Rate Analyses for an Accelerator-Driven System with 14 MeV Neutrons in Kyoto University Critical Assembly,” J. Nucl. Sci. Technol., 46, 965(2009).

[22] C. H. Pyeon, T. Misawa, J. Y. Lim et al., “First Injection of Spallation Neutrons Generated by High-Energy Protons into the Kyoto University Critical

Assembly,” J. Nucl. Sci. Technol., 46, 1091 (2009).

[23] H. Shahbunder, C. H. Pyeon, T. Misawa and S. Shiroya, “Experimental Analysis for Neutron Multiplication by using Reaction Rate Distribution in Accelerator-Driven System,” Ann. Nucl. Energy, 37, 592 (2010).

[24] H. Taninaka, K. Hashimoto, C. H. Pyeon et al., “Determination of Lambda-Mode Eigenvalue Separation of a Thermal Accelerator-Driven System from Pulsed Neutron Experiment,” J. Nucl. Sci. Technol., 47, 376 (2010).

[25] N. Hirakawa, H. Nara, T. Iwasaki et al., “Measurement and Analysis of Cadmium Ratios of Activation Foils in Thermal Critical Assembly (KUCA B3/8”P36EU-NU-EU),” J. Nucl. Sci. Technol., 30, 628 (1993).

[26] Y. Yamane, Y. Hirano, S. Shiroya and K. Kobayashi, “Measurement of Reactivity Effect and Thermal Neutron Flux in Non-uniformity Distributed Fuel Assemblies,” J. Nucl. Sci. Technol., 31, 640 (1994).

[27] H. Unesaki, T. Iwasaki, T. Kitada et al., , “Measurement of ^{237}Np Fission Rate Ratio Relative to ^{235}U Fission Rate on Cores with Various Thermal Neutrons Spectrum at the Kyoto University Critical Assembly,” J. Nucl. Sci. Technol., 37, 625 (2000).

[28] T. Iwasaki, T. Horiuchi, D. Fujiwara et al., “Measurement and Analyses of Capture Reactions Rate of ^{237}Np in Various Thermal Neutron Fields by Critical Assembly and Heavy Water Thermal Neutron Facility of Kyoto University,” Nucl. Sci. Eng., 136, 321 (2000).

[29] H. Unesaki, K. Kobayashi and S. Shiroya, “Assessment of ^{232}Th Nuclear Data through Analysis of Thorium-loaded Critical Experiments in Thermal-Neutron Systems using the Kyoto University Critical Assembly,” J. Nucl. Sci. Technol., 38, 370 (2001).