

액체금속로 안전규제요건 개발항목 분석

Analyses of Regulatory Requirements Development Items for Liquid Metal Reactors

안형준, 윤영길, 정운형, 신안동, 정애주, 이재훈

한국원자력안전기술원
대전광역시 유성구 구성동 19번지

요 약

우리나라는 중장기적으로 액체금속로 실증로인 KALIMER (Korea Advanced LIquid METal Reactor)의 연구개발을 추진하고 있다. 이에 따라 액체금속로의 설계안전성을 확보할 수 있는 규제요건을 수립할 필요가 있다. 이를 위하여 액체금속로를 건설한 경험이 있는 미국 및 일본의 규제요건 체계와, 각 체계 내에 설정되어 있는 액체금속로 관련 규제요건의 설정현황을 조사하였다. 그리고 액체금속로 고유 규제요건과 액체금속로에 적용되는 경수로 규제요건에 대한 분석을 수행하여 우리나라 액체금속로 규제요건 개발항목을 도출하였다. 즉, KALIMER와 경수로의 설계차이를 고려하여, 경수로 규제요건 가운데 액체금속로에 적용하기 위하여 보완해야 할 항목과, 액체금속로 고유 설계특성과 관련하여 신설해야 할 항목들을 도출하였다.

Abstract

The regulatory requirements for liquid metal reactors are required to be established to ensure the safety of KALIMER (Korea Advanced LIquid METal Reactor) being developed as a national project carried out in Korea. The regulatory requirements established for the regulation of LMRs of the U.S.A and Japan were analyzed in the aspects of framework and contents. Regulatory requirements for LWRs (Light Water Reactors) were also analyzed based on the differences of design concepts between KALIMER and LWRs. As a result of the analyses, regulatory requirement development items were identified for LMRs. They are the LWR regulatory requirement items that have to be modified for the application to LMRs, and the items that have to be newly developed for only LMRs.

1. 서론

우리나라는 중장기적으로 액체금속로 실증로인 KALIMER의 연구 개발을 추진하고 있다. 이에 따라 액체금속로의 설계안전성을 확보하기 위한 규제요건을 수립할 필요가 있다. 이를 위해 우선적으로 외국의 액체금속로 관련 규제요건의 현황을 조사하였다. 현재 액체금속로를 개발한 경험이 있는 국가에는 미국, 일본, 영국, 프랑스, 독일, 러시아, 인도 등이 있으며 이들 국가 가운데 액체

금속로에 대한 규제요건 및 지침을 별도로 개발하여 적용하고 있는 대표적인 국가는 미국과 일본이다. 따라서 미국과 일본의 액체금속로 관련 규제요건 및 지침의 체계와 규제요건에 대한 설정현황을 조사하였다. 미국과 일본의 경우, 규제요건의 상당부분을 기존의 경수로 규제요건을 그대로 또는 부분적으로 보완하여 적용하고 있으며, 경수로와 설계 차이점이 있는 부분에 대해서는 액체금속로 고유의 규제요건을 수립하여 적용하고 있다.

액체금속로 규제요건의 개발은 액체금속로와 경수로의 설계개념 차이에 대한 평가를 통하여 경수로 규제요건을 그대로 준용할 수 있는 부분, 보완해야 할 부분, 별도의 규제요건을 개발해야 할 부분으로 구분하여 추진되어야 한다. 본 연구에서는 미국과 일본의 액체금속로 관련 규제요건에 대한 설정현황을 조사하였으며, 액체금속로에 적용되는 규제요건과 그 내용을 분석하였다. 그리고 경수로 규제요건 가운데서 액체금속로의 규제에 적용하기 위해서 보완해야 할 항목과, 액체금속로의 고유 설계특성과 관련하여 신설해야 할 항목을 도출하였다.

2. 안전규제요건 체계 비교

미국의 원전 안전규제요건 체계는 최상위 요건인 원자력법 (The Atomic Energy Act)을 비롯하여 미국 연방규정인 10 CFR (Code of Federal Regulations), 10 CFR의 이행을 위한 원자력규제위원회 (Nuclear Regulatory Commission: NRC)의 규제지침 (Regulatory Guide), SRP (Standard Review Plan) 등으로 구성된다. 법적인 강제성과 구속력을 갖고 있는 것은 원자력법과 10 CFR 뿐이지만 규제의 실효성 측면에서 본다면 규제지침과 표준심사지침의 허용기준 (Acceptance Criteria)도 규제활동을 통하여 결국에는 이행되므로 안전규제요건의 체계에 속한다고 간주할 수 있다. 이 외에도 10 CFR 또는 규제지침에서 NRC의 NUREG 보고서와 ASME의 B&PV (Boiler and Pressure Vessel) Codes 및 ANSI등이 준용되어 적용되고 있다.

일본의 원전에 대한 안전규제요건의 체계는 원자력기본법을 모체로 하여 핵물질, 핵연료물질 및 원자로의 규제에 관한 법과 전기사업법 등의 법(法)이 있으며 시행령에 해당되는 정령(政令), 시행규칙에 해당하는 각종 총리부령(總理府令) 및 성령(省令), 그리고 고시(告示)로 구성되어 있다. 그 하부에는 실질적인 안전규제요건으로서 원자력안전위원회 안전심사지침 등이 있다.

우리나라, 미국 및 일본의 안전규제요건의 체계를 비교하여 표 1에 제시하였다. 여기에서 굵은 글씨로 표시한 부분은 액체금속로 고유 규제요건과 관련이 있는 규정이다.

3. 액체금속로 안전규제요건/지침 분석

3.1 미국

미국의 규제요건중에서 원자력법, 10 CFR, 10 CFR 50 App.A인 GDC (General Design Criteria)는 일반적으로 경수형 원자로에 적용되지만 부분적으로는 액체금속로에도 적용된다. GDC의 서론에 따르면 GDC는 경수형 원자력발전소에 대한 최소한의 중요한 설계요건을 설정한 것으로서, 다른 형태의 원자력발전소에도 적용할 수 있으며 그러한 발전소의 주요 설계기준을 설정하는데 지침을 제공하도록 의도되었음을 밝히고 있다 [1]. 따라서 GDC는 액체금속로에도 부분적으로 적용가능하다.

미국의 액체금속로에 대한 규제요건의 설정현황을 살펴보면, GDC, 10 CFR 50, SRP, Reg. Guides 등에는 설정되어 있지 않으며, NRC가 1983년과 1994년에 각각 발간한 Clinch River Breeder Reactor (CRBR)의 건설허가에 대한 안전성평가보고서 (NUREG-0968) [2]와, PRISM 사전신청 안전성평가보고서 (NUREG-1368) [3]에 기술되어 있다. 그리고, 미국의 국립표준원 및 원자력협회는 1989년에 액체금속로 설계를 위한 일반안전설계기준 [4]을 제정하였다.

표 1. 한국, 미국 및 일본의 안전규제요건 체계에서의 액체금속로 관련 규제요건/지침

한 국	미 국	일 본
<ul style="list-style-type: none"> ■ 원자력법 	<ul style="list-style-type: none"> ■ Atomic Energy Act 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 원자력기본법 ■ 원자로등 규제법 ■ 전기사업법
<ul style="list-style-type: none"> ■ 원자력법시행령 <ul style="list-style-type: none"> - 위치 - 구조설비 - 성능 - 운영 - 품질보증 ■ 원자력법시행규칙 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 10CFR 50, App.A, GDC 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 정령 ■ 총리부령 <ul style="list-style-type: none"> - 시험연구용 원자로등의 설계 및 공사방법의 기술기준 (고속로 관련조항) ■ 통상산업성령
<ul style="list-style-type: none"> ■ 과기부장관고시 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 10CFR 50 ■ 10CFR 52 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 통상산업성 고시
<ul style="list-style-type: none"> ■ 안전심사지침서 	<ul style="list-style-type: none"> ■ SRP, Acceptance Criteria ■ Regulatory Guides 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 원자력안전위원회 안전심사지침 <ul style="list-style-type: none"> - 발전용 경수형 원자로시설에 관한 안전설계심사지침 - 고속증식로 안전성 평가방법
<ul style="list-style-type: none"> ■ 안전성평가보고서 	<ul style="list-style-type: none"> ■ PRISM SER (NUREG-1368) ■ CRBR SER (NUREG-0968) 	
<ul style="list-style-type: none"> ■ 산업기준 	<ul style="list-style-type: none"> ■ ANSI/ANS-54.1 액체금속로 일반안전설계기준 ■ ASME B&PV Code 	<ul style="list-style-type: none"> ■ 산업기준

3.1.1 CRBR 건설허가 안전성평가보고서

NRC는 액체금속로인 CRBR에 대한 안전성평가보고서에서 CRBR에 대한 주요 설계기준을 설정하고, 기존의 GDC와 비교·평가를 수행하여 GDC와 동일한 항목, 유사한 항목, CRBR에 적용할 수 없는 항목, CRBR 고유의 항목을 도출하였다. CRBR의 주요 설계기준 항목은 60개이며 GDC 중에서 CRBR에 적용할 수 없는 항목은 7개이다.

3.1.2 PRISM 사전신청 안전성평가보고서

NRC는 액체금속로인 PRISM에 대한 사전신청 안전성평가보고서에서 PRISM 설계에 대해 신청자가 제시한 일반설계기준과 NRC가 제시한 일반설계기준을 명시하고 양자간의 불일치 항목에 대해서는 일반설계기준을 부분적으로 개정하는 방안을 제시하고 있다.

또한 PRISM에 대해서 GDC의 적용성을 평가하여 그 결과를 그대로 적용, 보완후 적용, 적용 불가능, 신설 필요 기준으로 분류하였다. PRISM에 대한 GDC의 적용성 평가결과는 표 2에 제시되어 있다.

3.1.3 액체금속로 원자력발전소 일반안전 설계기준

ANSI/ANS-54.1-1989는 액체금속로 원자력발전소에 대하여 최소한의 안전요건을 규정하고 있

는 일반안전 설계기준으로서 경수형 원자력발전소 일반설계기준인 GDC 대신에 액체금속로 설계에 적용되도록 규정한 산업기준이다. 이 기준의 주요 내용은 전체요건, 다중 핵분열생성물 방벽에 의한 보호, 보호 및 반응도제어계통, 냉각재계통, 원자로 격납용기/격납계통, 핵연료 및 방사능제어 분야 등 총 58개 항목으로 구성되어 있다.

상기에서 논의한 CRBR 및 PRISM에 대한 안전성평가보고서, ANSI/ANS-54.1에 제시된 액체금속로 고유 규제요건 항목을 비교하면 표 3과 같다.

표 2. PRISM에 대한 GDC의 적용성 평가

적용성 구분	GDC 항목
그대로 적용가능	1, 2, 3, 5, 10, 11, 12, 13, 14, 16, 18, 20, 21, 22, 24, 29, 30, 32, 42, 43, 52, 53, 54, 56, 60, 62, 63
보완후 적용가능	4, 15, 17, 19, 23, 25, 26, 27, 28, 31, 34, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 44, 45, 46, 50, 51, 55, 57, 61, 64
적용 불가능	33, 35
신설 필요기준	<ul style="list-style-type: none"> • 소듐 반응에 대한 보호 • 소듐 가열계통 • 일차 및 중간열전달계통 • 소듐 냉각재 재고량 보장 • 소듐 및 커버가스 순도제어 • 잔열제거계통의 검사 및 시험 • 핵연료봉 손상 전파에 대한 보호 • 핵연료봉 유동 차단에 대한 보호

표 3. 미국의 액체금속로 고유 규제요건 항목 비교

요건 항목 \ 요건 종류	CRBR SER	PRISM SER	ANSI/ANS 54.1
소듐 반응으로부터의 보호	4	3.2.4.1	
소듐 가열계통	7	3.2.4.2	3.1.7
열전달계통 설계	26	3.2.4.3	-
중간냉각계통 설계	31	3.2.4.5	3.4.5
원자로냉각재 재고량 보장	27	3.2.4.4	3.4.1
중간냉각재경계의 파손방지	32		
중간냉각재경계의 검사 및 점검	33		3.4.6
원자로, 중간냉각재 및 커버가스 순도제어	34	3.2.4.6	3.4.4
잔열제거계통의 검사	36	3.2.4.7	3.4.8
잔열제거계통의 시험	37	3.2.4.7	3.4.9
핵연료봉 손상 전파로부터의 보호	59	3.2.4.8	
냉각재유동 차단으로부터의 보호	60	3.2.4.9	

주) 제시된 숫자는 관련 자료에서 표기한 규제요건 항목의 번호임.

3.2 일본

일본의 안전규제요건 체계중에서 액체금속로와 관련되는 대표적인 규정은 “시험연구용 원자로

등의 설계 및 공사방법의 기술기준에 관한 총리부령” 제4장의 나트륨냉각형 고속로에 관한 원자로시설 (제42조 ~제51조)에 명시되어 있다[5]. 세부 요건으로는 원자력 안전위원회가 제정한 “고속증식로 안전성의 평가방법 지침”과 별지로 첨부된 “액체금속냉각 고속증식로 (LMFBR)의 안전설계와 안전평가에 대하여”를 들 수 있다[6].

3.2.1 시험연구용 원자로등의 설계 및 공사방법의 기술기준에 관한 총리부령

동 총리부령 제4장에는 나트륨냉각형 고속로에 관한 원자로시설에 대한 요건을 제42조 ~제51조에서 규정하고 있다. 주요 항목은 다음과 같다:

- 나트륨냉각형 고속로에 관한 원자로시설
- 나트륨 누설에 의한 영향 방지
- 노심등
- 나트륨의 취급
- 커버개스의 취급
- 냉각설비등
- 원자로냉각재압력경계등
- 계장
- 제어설비등

제43조는 나트륨 누설에 의한 물리적 또는 화학적 효과가 원자로시설의 안전에 영향을 미칠 가능성이 있는 경우 그 영향을 억제하기 위하여 적절한 조치를 강구할 것을 규정하고 있다. 제45조는 나트륨을 취급하는 기기는 나트륨과의 공존성을 고려하여 적절한 재료를 사용하여야 할 것을 규정하고 있다. 제46조는 커버개스와 관련하여 커버개스는 나트륨에 대하여 화학적으로 안정한 성질을 가져야 하며 또한 운전시 방사선에 노출되는 가혹한 조건하에서도 필요한 물리적 및 화학적 성질을 유지할 것을 규정하고 있다. 또한 커버개스를 취급하는 계통은 압력이 과도하게 상승하는 것을 방지하는 설비를 구비할 것을 요구하고 있다.

3.2.2 안전심사지침

▣ 발전용 경수형 원자로시설에 관한 안전설계심사지침

안전설계심사지침은 일본 원자력안전위원회에서 제정한 것으로서 총59개의 지침과 용어, 각 지침과 용어에 대한 해설로 구성되어 있다. 이 지침은 크게 원자로시설 전반, 원자로 및 원자로 정지계, 원자로냉각계, 원자로격납용기, 안전보호계, 제어실 및 긴급시 시설, 계속제어 및 전기계통, 연료취급계, 방사성폐기물 처리시설, 방사선관리로 분류되어 있다. 이러한 대분류는 미국의 GDC의 분류와 유사한 것이다.

▣ 고속증식로 안전성 평가방법 지침

1980년 원자력안전위원회는 원자로안전기준전문부회가 고속증식로 안전성 평가방법에 대한 지침으로서 제시한 “고속증식로 안전성 평가방법에 대하여”에 대한 검토한 결과 고속증식로 안전심사에 이 지침을 적용하는 것이 타당하다는 결론을 내렸다. 원자력안전위원회는 실험용 고속증식로인 JOYO의 경험을 바탕으로 외국의 액체금속로 안전성 평가방법을 참고하여 당면한 안전성 평가의 대상인 액체금속로 MONJU를 염두에 두고 이 지침을 검토를 하였다. 이 지침에서는 고속증식로가 연구개발단계의 노형이므로 규정을 개괄적으로 기술하고 있으며 추후 체계적이고 상세한 안전성 평가방법의 확립이 요구됨을 명시하고 있다. 특히 액체금속로의 고유특성에 대해서 적용할 수 있는 규정이 별지로서 “액체금속냉각 고속증식로(LMFBR)의 안전설계와 안전평가에 대하여”라는 제목으로 첨부되어 있다.

이 별지는 LMFBR의 안전설계와 관련하여, 전반적인 설계에 대해서는 “발전용 경수형 원자로 시설에 관한 안전설계심사지침에 대하여” 및 “발전용 원자로 시설에 관한 내진설계심사지침에 대하여”를 참고할 것을 규정하고 있다. 그리고 액체금속로 고유특성과 관련된 부분에 대해서는 노심, 연료, 나트륨, 나트륨 보이드, 원자로 정지계, 원자로 냉각재경계 및 커버가스 등의 경계, 중간냉각계, 붕괴열의 제거, 격납용기, 고온구조, 내진성 등의 분야에 대하여 충분히 검토할 것을 규정하고 있다. 이들 규정의 상세한 내용 및 총리부령의 주요 내용이 표 4에 제시되어 있다.

표 4. 일본 액체금속로 관련 규제요건의 주요 내용 비교

항 목	고속증식로 안전성 평가방법 지침	일본 총리부령
노심	<ul style="list-style-type: none"> •재료가 받는 높은 방사선조사량 고려 •나트륨보이드 반응도가 양이 될 수 있음을 고려 	<ul style="list-style-type: none"> •제44조 노심등
연료	<ul style="list-style-type: none"> •연료집합체의 변형 •유로폐쇄의 방지 	-
나트륨	<ul style="list-style-type: none"> •나트륨 화재방지 대책 •나트륨과 재료의 공존성, 나트륨의 방사화에 대한 고려 	<ul style="list-style-type: none"> •제43조 나트륨 누설에 의한 영향 방지 •제45조 나트륨의 취급: 나트륨과의 공존성을 고려한 재료 사용
나트륨보이드	<ul style="list-style-type: none"> •나트륨보이드 반응도의 영향을 고려하여 비등과 커버가스 유입방지 	-
원자로정지계	<ul style="list-style-type: none"> •상호 독립된 복수의 계통, 신뢰성있는 설계 	-
원자로 냉각재경계 및 커버가스 등의 경계	<ul style="list-style-type: none"> •누설가능성 최소화, 누설검출 설계 •커버가스경계의 누설가능성 최소화 •나트륨사용을 고려한 검사방법 	<ul style="list-style-type: none"> •제46조 커버가스의 취급: 나트륨에 대해서도 화학적으로 안정, 방사선 노출환경에서도 물리적 화학적 성질유지, 압력상승방지 설비 •제48조 원자로냉각재압력경계등
중간냉각계	<ul style="list-style-type: none"> •1차냉각재의 중각냉각계로의 누출방지 •물-증기계에서 중간냉각계로의 누설시에도 안전성 확보 	<ul style="list-style-type: none"> •제47조 냉각설비등: 원자로용기내 발생열을 제거할 수 있는 용량과 냉각재순환설비
붕괴열 제거	<ul style="list-style-type: none"> •냉각재의 유량상실 또는 유출시 냉각기능 확보 및 붕괴열제거 	<ul style="list-style-type: none"> •제47조 냉각설비등
격납용기	<ul style="list-style-type: none"> •가상사고하에서 방사성물질의 방출억제 	-
고온구조	<ul style="list-style-type: none"> •고온 나트륨하에서 사용되는 기기의 재료에 대한 고려 	<ul style="list-style-type: none"> •제45조 나트륨의 취급: 나트륨과의 공존성을 고려한 재료 사용
내진성	<ul style="list-style-type: none"> •저압 고온조건을 고려한 내진설계 •고속로의 설계특성을 고려하여 내진분류 	-
계장	-	<ul style="list-style-type: none"> •제49조 계장
제어설비	-	<ul style="list-style-type: none"> •제50조 제어설비등

또한 이 별지는 LMFBR의 안전평가와 관련하여, “발전용 경수형 원자로시설의 안전평가에 관한 심사지침에 대하여”를 참고로 하고, 액체금속로의 고유특성과 관련된 부분을 추가하여 평가하는 것이 필요하다고 명시하고 있다. 그리고 다음사항을 규정하고 있다:

- LMFBR 원자로시설 설계의 기본방침 타당성 확인을 위하여 운전시의 과도상태 및 사고 등에 대한 대표적인 사건을 선정하여 평가해야 한다.
- 이러한 대표적인 사건의 선정시에는 LMFBR의 특성을 고려해야 하며 평가에 적용되는 판단 기준을 제시해야 한다.
- 사고로 분류된 사건보다 발생빈도는 적지만 결과가 중대한 것으로 예상되는 사건에 대한 평가방법도 고려해야 한다.

액체금속로의 안전성 평가에 있어서 적용가능한 원자력안전위원회의 안전심사지침은 표 5에 제시되어 있다.

표 5. 액체금속로에 적용 가능한 일본의 안전심사지침

적용성 구분	지침의 종류
액체금속로에 그대로 적용되는 지침	<ul style="list-style-type: none"> • 고속증식로 안전성 평가방법 • 원자로 입지심사지침 및 그 적용에 관한 판단의 기준에 대하여 • 플루토늄에 관한 기준선량에 대하여 • 발전용 원자로시설의 안전해석에 관한 기상지침
액체금속로에 참고할 수 있는 지침	<ul style="list-style-type: none"> • 발전용 경수형 원자로시설에 관한 안전설계심사지침* • 발전용 경수형 원자로시설의 안전평가에 관한 심사지침 • 발전용 원자로시설에 관한 내진설계 심사지침
액체금속로의 정상운전시 환경으로의 방사성 물질의 방출량에 대해 참고할 수 있는 지침	<ul style="list-style-type: none"> • 발전용 경수형 원자로시설 주변의 선량목표치에 대한 평가지침 • 발전용 경수형 원자로시설에서의 방출 방사성 물질의 측정에 관한 지침

*액체금속로 고유특성과 관련된 부분에 대해서는 “고속증식로의 안전성평가방법 지침”의 별지규정 적용

4. 액체금속로 규제요건 개발항목 도출

액체금속로의 규제요건을 체계적으로 개발하기 위해서는 우선적으로 개발항목을 도출하고 그 후에 각각의 개발항목에 대한 규제입장을 수립하는 것이 바람직하다. 이 절에서는 “3. 미국 및 일본의 액체금속로 안전규제요건/지침 분석”에서 수행한 분석결과를 토대로 우리나라 액체금속로 규제요건의 개발항목을 도출하고자 한다.

액체금속로는 원자로 냉각재로서 액체 소듐을 사용하며, 운전조건이 경수로에 비해서 상대적으로 저압, 고온이며, 플루토늄-우라늄 혼합산화물을 연료로서 사용하며, 고속중성자를 이용하여 핵연료물질을 증식시킴으로써 출력밀도 및 연소도가 높다. 그리고 플랜트 측면에서는 원자로냉각계통과 증기계통 사이에 중간냉각계통을 가지며, 원자로용기 상부에는 커버그스가 채워져 있는 등 경수로와는 다른 설계특성을 가지고 있다. 따라서 이러한 설계특성을 고려하여 미국과 일본의 규제요건/지침을 비교 분석한 결과, 액체금속로 규제요건 개발항목을 도출하였다. 개발항목은 설계 차이로 경수로의 규제요건을 보완해야 할 항목과 신설이 요구되는 항목으로 구분하였다.

4.1 경수로 규제요건을 보완해야 할 항목

액체금속로의 설계특성이 경수로와는 상당한 차이가 있으므로 경수로 규제요건을 액체금속로에 적용할 때에는 이러한 설계특성 상의 차이점을 고려하여 일부 규제요건을 변경하여야 한다. 보완이 필요한 주요 규제요건 항목은 다음과 같다.

▣ 핵연료 건전성 보호요건, 노심손상 허용기준

액체금속로의 피복관 재료는 경수로의 피복관 재료와 기계적 특성이 상이하므로 원자로 정상 운전 및 예상운전과도상태 (Anticipated Operational Occurrence)에서의 핵연료 건전성 보호요건과 사고조건에서의 노심손상 허용기준이 변경되어야 한다.

▣ 환경 및 동적효과 설계기준

경수로의 경우에는 원자로냉각재의 운전조건이 고압이어서 냉각재상실사고시 누출되는 냉각재에 의한 동적효과가 주변의 설비에 미치는 영향이 심각하므로 이를 수용할 수 있도록 설계되어야 한다. 그러나 액체금속로의 경우에는 원자로냉각재계통 및 중간냉각재계통의 운전압력이 낮아서 냉각재상실사고에 의한 동적효과가 적은 반면 액체소듐에 의한 효과가 심각하므로, 안전에 중요한 설비들이 소듐 및 소듐 에어로졸과 연소물질의 효과를 포함하는 가상사고에 의한 환경조건의 영향을 수용할 수 있도록 관련 요건이 보완되어야 한다.

▣ 구조설계 하중

액체금속로의 운전조건이 경수로에 비해서 고온이므로 기기의 구조적 건전성을 보장하기 위해서는 경수로에 적용하는 설계하중 뿐만 아니라 thermal ratcheting, 크리프, 열응력 등 고온에 의한 구조물 손상 메커니즘을 고려하도록 구조설계 관련 요건을 보완하여야 한다.

▣ 원자로냉각재 보충

KALIMER는 경수로와는 달리 전체 원자로냉각재계통이 원자로용기 내부에 존재하고 원자로 냉각재의 운전압력 (0.25MPa)이 대기압에 가까우므로 원자로의 가동중에 배관 및 관련 설비를 통한 원자로냉각재 누설의 가능성이 경수로에 비해서 상대적으로 크게 작다. 특히, KALIMER의 경우 정상운전 및 예상운전과도상태 시에 원자로냉각재의 누설 또는 소형 LOCA의 발생경로가 될 수 있는 유일한 경로는 원자로용기인데, 원자로용기를 통해서 원자로냉각재가 누설되더라도 노심이 노출되지 않도록 하는 설계개념을 채택하고 있어서 경수로에서 요구되는 원자로냉각재 보충에 대한 요건이 보완되어야 할 필요가 있다.

▣ 반응도제어계통의 다중성 및 능력

액체금속로에서는 소듐의 순도가 노심의 반응도에 영향을 미치므로 경수로에서와 같이 액체 제어재를 냉각재에 혼합하여 반응도를 제어하는 설계개념을 사용할 수 없다. 따라서 반응도제어계통의 다양성을 위해서 설치되는 반응도제어계통들은 대부분 제어봉을 사용하고 있으므로, “비상노심냉각계통에 의한 독물주입과의 조합능력으로 사고조건 시에 노심냉각능력을 유지할 수 있음을 보장해야 한다”는 요건을 비롯하여 독물주입을 사용한 반응도제어계통의 설계와 관련된 경수로 요건은 보완되어야 한다.

▣ 비상잔열제거

KALIMER에서의 비상잔열제거는 피동형 안전붕괴열제거계통 (PSDRS: Passive Safety Decay Heat Removal System)을 통하여 수행된다. PSDRS는 설계특성 상 다중성을 제공할 수 없도록

설계되어 있으므로, 경수로의 잔열제거계통에 대해서 적용하던 “단일고장을 가정하더라도 안전기능이 수행될 수 있음을 보장하기 위해서, 기기의 적절한 다중성이 제공되어야 한다”는 요건을 적용하는 것이 곤란하며 피동형계통에서의 단일고장을 어떻게 정의할 것인지도 문제가 되고 있다.

▣ 비상노심냉각

경수로의 비상노심냉각계통은 ① LOCA 시의 냉각재 공급, ② 독물 주입을 통한 원자로 정지여유도 확보, ③ 노심 장기냉각 등의 기능을 담당한다. 그러나 KALIMER에서는 일차냉각재계통의 압력이 낮고 격납용기에 의해서 LOCA가 심각한 사고로 진전되지 않도록 설계되므로, LOCA를 중요한 사고로 고려하지 않고 있으며 경수로에서 처럼 원자로냉각재에 독물을 주입하여 원자로 정지여유도를 확보할 수도 없다. 결국 경수로의 비상노심냉각 관련 기능 중에서 KALIMER에서 중요하게 고려하는 기능은 노심 장기냉각 기능뿐이며 이 기능은 PSDRS가 담당하고 있다. PSDRS는 설계특성상 다중성을 제공하기가 곤란하므로 비상노심냉각계통의 신뢰성을 보장하기 위한 경수로 규제요건, “소내전원 또는 소외전원 가운데서 하나의 전원만이 가용할 때 단일고장을 가정하더라도 안전기능이 수행될 수 있음을 보장하기 위해서, 기기의 적절한 다중성과 설계특징, 적절한 상호연결, 누설탐지 및 격리능력이 제공되어야 한다”는 적용하기가 어려운 상황이다.

또한 KALIMER에서는 노심에서의 피복관 금속-물 반응이 없으므로 비상노심냉각과 관련된 설계시 경수로에 적용하여 왔던 “핵연료 피복관 금속-물 반응이 무시할 만한 수준으로 제한될 수 있도록 LOCA 후에 노심으로부터 열을 전달할 수 있어야 한다”는 요건도 변경되어야 할 것이다.

▣ 격납용기 설계기준

경수로 격납계통 설계기준은 LOCA로부터 야기되는 압력 및 온도 조건을 수용할 수 있도록 설계하는 것이지만 KALIMER의 경우 LOCA가 중요한 사건이 아니므로 가상 사고에 대한 검토를 통하여 격납계통의 설계기준에 사용될 가상사고를 선정하여야 한다. 또한 증기발생기 및 관련 계통이 격납계통 외부에 위치하므로 경수로에서와 같이 증기발생기로부터 발생하는 에너지도 고려할 필요가 없으며 대신에 소듐의 화학반응에 의한 에너지를 고려해야 할 것이다.

KALIMER에서는 노심냉각에 물을 사용하지 않으며 격납계통 내부에 물이 존재하지 않으므로 경수로 격납계통의 설계시 고려하는 중대사고 조건인 핵연료 피복관-물 반응에 의한 에너지를 고려할 필요가 없다. 대신에 KALIMER에서의 주요 중대사고 경위 (Hypothetical Core Disruption Accident 등)에 대한 검토를 통하여 격납계통 설계에 고려해야 될 중대사고 조건을 선정하여야 한다.

따라서 상기의 사항들을 고려하여 격납용기 설계기준이 보완되어야 한다.

▣ 산업기술기준의 적용

액체금속로의 운전조건이 경수로보다 고온이므로 설계에 적용하는 산업기술기준에 있어서도 경수로에 적용하는 기존의 산업기술기준 뿐만 아니라 ASME Code III, NH 및 Code Case 47 도 적용하도록 규제요건을 보완하여야 한다.

4.2 신설해야 할 규제요건 항목

액체금속로는 경수로와 설계개념이 상이하므로 액체금속로 고유의 설계특성을 갖고 있다. 이러한 부분에 대해서는 별도의 규제요건을 신설하여야 한다. 신설되어야 할 주요 규제요건 항목은 다음과 같다.

▣ 소듐 반응으로부터의 보호

소듐은 물, 공기, 콘크리트에 대한 화학적 반응도가 매우 높다. 따라서 이러한 화학적 반응으로부터 안전에 중요한 설비를 보호하기 위한 규제요건을 신설하여야 한다. 소듐 반응과 관련된 요건 항목에는 소듐-물 반응 및 소듐화재로부터의 보호가 고려되어야 한다.

▣ 소듐 가열

소듐을 액체상태로 유지하고 소듐 에어로졸이 응고되거나 유로를 막는 것을 방지하기 위해 소듐을 가열하는 설비가 있어야 하므로 소듐 가열에 대한 규제요건 항목의 신설이 필요하다.

▣ 원자로냉각재, 중간냉각재 및 커버가스 순도제어

소듐에 불순물이 유입되면 노심 반응도가 저하되어 원자로정지가 발생하므로, 소듐의 순도를 유지하기 위해서 소듐 및 커버가스의 순도를 감시하고 불순물이 유입될 경우에 불순물을 정화하는 설계가 요구되므로 이를 규정하는 요건의 신설이 필요하다.

▣ 원자로 설계

액체금속로에서는 냉각재로서 액체 소듐을 사용하므로 소듐 보이드 반응도가 양이 될 수 있다. 따라서 이를 제한 할 수 있는 규제요건의 신설이 필요하다.

노심요소의 집합체가 덕트 형태로 설계되므로 덕트 입구에 유동의 막힘 (flow blockage)이나 제한이 발생하지 않도록 설계되어야 하므로 이를 규정하는 규제요건의 신설이 요구된다.

▣ 중간열전달계통 설계

액체금속로에는 증기발생기에서의 사고시 원자로냉각재를 통하여 방사성물질이 누출되는 것을 방지하기 위해서 경수로에는 존재하지 않는 중간열전달계통을 설치하여 방사성물질의 누출가능성을 최소화하고 있다. 따라서 이러한 중간열전달계통의 설계기준을 제시하는 규제요건이 신설되어야 한다.

▣ 전자식 냉각재 펌프

KALIMER에서는 냉각재펌프로서 전통적인 기계식 펌프 대신에 전자식 펌프를 채택하고 있다. 전자식펌프의 경우에는 회전부품이 없으므로 전력공급이 상실될 경우 냉각재 유동의 coastdown이 불가능하므로 이를 보장하기 위한 요건과 전자식 펌프의 성능유지를 위한 요건 등의 개발이 필요하다.

▣ 중간열교환기

중간열교환기는 그 내부에서 전열관을 경계로 하여서 일차 및 이차 소듐이 흐르므로 전열관의 건전성이 상실되더라도 원자로냉각재가 이차 소듐으로 누출되지 않도록 설계되어야 한다. 또한, 증기발생기와 배관으로 연결되어 있으므로 증기발생기에서의 소듐-물 반응시의 영향으로부터 보호되도록 설계되어야 한다. 따라서 이러한 사항을 규정하는 규제요건의 신설이 필요하다.

▣ Gas Expansion Module (GEM) 설계

KALIMER에서는 원자로냉각재 유량상실사고시의 노심 정지여유도 확보를 위해서 유량상실사고시 유효노심으로부터 중성자를 누설시키므로써 음의 반응도를 유발시키는 피동형 반응도제어 장치인 GEM을 채택하고 있다. 따라서 이러한 설비의 안전기능 보장을 위한 설계기준을 제시해주는 규제요건의 신설을 고려해야 한다.

▣ 면진설계

액체금속로에서는 지진으로부터 안전에 중요한 설비를 보호하기 위해서, 지진하중을 설비의 구조 설계하중으로 고려하여 설계하는 내진설계 개념 대신에 면진설비를 사용하여 구조물이나 기기를 지반으로부터 분리시켜 지진하중이 발전소 설비에 직접 전달되지 못하도록 설계하는 면진설계를 채택하고 있다. 이 개념은 경수로에서는 사용하지 않는 설계개념으로서 원자력발전소에 대한 지진보호 설계 관점에서는 새롭게 도입되는 개념이므로 면진계통의 성능검증과 해석모델 및 방법의 검증, 구조물 및 기기의 지진보호설계 등과 관련된 요건의 설정이 필요하다.

▣ 핵연료 취급설비

액체금속로에서는 핵연료 교환시 소동과 공기의 접촉을 막아야 하므로 핵연료 취급설비에 외부공기가 원자로용기로 유입되는 것을 차단하기 위한 기능이 주어져야 하므로 이를 규정하는 규제요건의 신설이 요구된다.

5. 결론

액체금속로의 설계안전성을 확보할 수 있는 안전규제요건의 수립을 위하여 미국 및 일본의 액체금속로의 규제요건 설정 현황을 조사하였다. 미국과 일본의 경우 액체금속로에 대한 규제시 기준의 경수로 규제요건을 그대로 또는 부분적으로 보완하여 적용하면서 액체금속로 고유 설계특성에 대해서는 별도의 규제요건을 수립하거나 규제기관의 안전성평가보고서 등에서 요건의 방향을 제시하고 있다. 외국의 액체금속로 관련 규제요건의 비교·분석을 통하여, 경수로 규제요건을 액체금속로에 적용하기 위해서 보완되어야 할 주요 규제요건 항목과, 액체금속로 고유 설계특성과 관련하여 신설되어야 할 주요 규제요건 항목을 도출하였다. 도출된 액체금속로 규제요건 개발항목은 향후 검토를 통해서 조정될 수 있으며 추후 우리나라 액체금속로 규제요건/지침의 개발에 활용될 것이다.

참고문헌

- [1] Code of Federal Regulation, US Government Printing Office
- [2] NUREG-0968, Safety Evaluation Report related to the construction of the Clinch River Breeder Reactor Plant, March 1983, USNRC
- [3] NUREG-1368, Preapplication Safety Evaluation Report for the Power Reactor Innovative Small Module (PRISM) Liquid-Metal Reactor, Final Report, Feb. 1994, USNRC
- [4] ANSI/ANS 54.1-1989, General Safety Design Criteria for a Liquid Metal Reactor Nuclear Power Plant
- [5] 原子力規制關係法令集, 科學技術廳 原子力安全局 監修, 大成出版社
- [6] 原子力安全委員會 安全審査指針集, 改訂8版, 科學技術廳 原子力安全局 原子力安全調査室 監修, 大成出版社

- [7] KANT/R-001/97, 액체금속로 안전 및 인허가 규제요건에 관한 연구, 1997.7, 한국원자력 기술 협회
- [8] KAERI/RR-1719/96, 액체금속로 설계개념 연구, '96.7, 한국원자력연구소