



개량형 비등수로(ABWR)의 설계 특성

高橋 祐治

동경전력(주) 원자력기술부 과장

개량형 비등수형 경수로 (ABWR)는 일본의 비등수형 경수로(BWR) 운전 업체 및 제조업체(GE, 히다치 및 도시바)의 공동 노력으로 국제 표준 BWR로 개발되어 왔다.

ABWR은 일본 원전의 설계·건설·운전 및 유지 보수 경험에 기초한 공동 목표에 부합되는 최초의 원자로이며 ABWR의 개발 목적은 다음과 같다.

- ① 안전성 및 신뢰성의 향상
- ② 작업 현장에서의 방사선 피폭 및 방사성 폐기물의 수량 저감
- ③ 운전 및 유지 보수 능력의 향상
- ④ 경제성 향상

최초의 ABWR 원전은 가시와자키 가리와 6호기와 7호기의 2개의 유니트로서 모두 설계 목표를 충족시키면서 각각 91년 및 92년에 착공되어 96년 11월 7일 및 97년 7월 2일에 준공되었다.

이들 2기의 원전은 첫 연료 주기를 순조롭게 완료하였으며 현재 2번째 연료 주기가 진행중에 있다.

본 논문은 ABWR의 안전성, 경제성 및 건설 능력에 초점을 맞추면서 개발 목적이 ABWR의 설계 특성과 설계 고찰에 의해 어떻게 성취되었는가를 서술하고 있으며 아울러 ABWR의 미래도 언급하고 있다.

ABWR의 업적

1. 안전성의 향상

가. 향상된 안전성

ABWR의 안전성은 3개 독립 부분의 비상 노심 냉각 계통(ECCS) 네트워크를 채택함으로써 기존의 BWR보다 더욱 향상되었다.

각 부분의 ECCS는 고압 및 저압 분사 시스템으로 구성된다.

ABWR의 노심 손상 빈도(core damage frequency)는 $10^{-7}/RY$ 이

하로서 기존의 BWR보다 매우 향상되었다.

〈그림 1〉에서 보는 바와 같이 원자로 압력 용기(RPV)의 하부에 부착된 원자로 내부 펌프(RIP)는 기존 BWR의 원자로 노심면(core level) 아래에 위치해 있다.

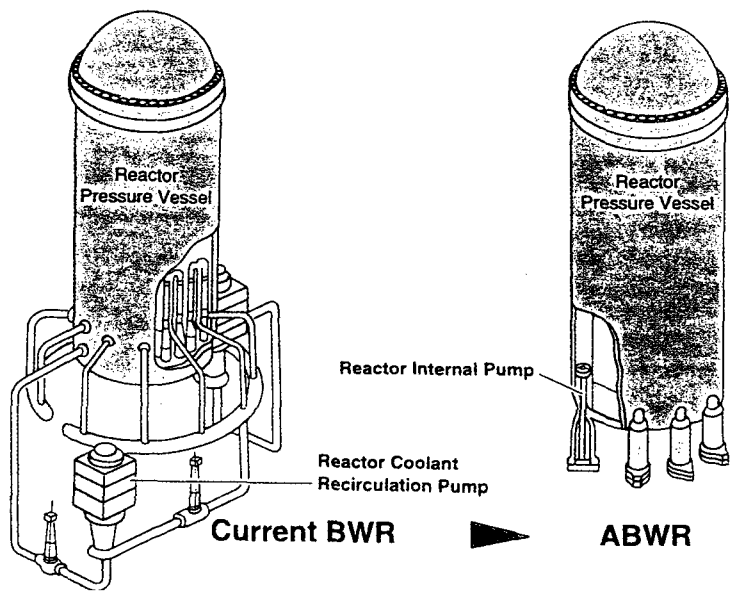
그 결과 노심은 가상의 냉각재 상실 사고(LOCA)시 가려져 있을 것으로 예상되고 있다.

중대 사고에 대한 대책은 ABWR의 설계에 반영되었다.

대체 분사 시스템인 lower dry well flooder 및 원자로 격납 용기 통기구 시스템(containment vent system)이 설치되고 비상 동력은 같은 형태의 2개 유니트 중 어느 쪽에서든 공급될 수 있다.

나. 작업 현장의 방사선 피폭 저감
작업 현장에서의 방사선 피폭은 감소되어 왔다.

이것은 한편으로는 축적된 설계,



〈그림 1〉 원자로 내부 펌프

〈표 1〉 건물 체적의 비교

(X 10⁴m³)

	기존의 BWR(K-2/5의 평균)	ABWR(K-6/7의 평균)
원자로 건물	45	21
제어 건물		4
방사성 폐기물 건물		6
터빈 건물	41(CWP 포함)	38
증기교환기 건물	5	
합계	91(100%)	39(76%)

주: 외벽 치수 기준: 매트(mat) 포함

운전 및 유지 보수 경험에 기인한 것이며, 다른 한편으로는 ABWR의 설계 특성에 기인한다.

원자로 냉각재 재순환(PLR) 배관의 제거는 압력 용기 내부 주요 방사선원 1개의 제거와 같이 작업 현장의 조사와 관련된 방사선 피폭 저감에 기여한다.

저코발트 방사성 물질은 순환수 증

기 튜브 및 제어봉 guide roller에 이용되고 있다.

미세 조정 가능 제어봉 구동 장치(FMCRD) 내부의 guide roller 일부는 이러한 것들이 ABWR의 설계에 적용되어 cobalt-free roller로 교체되었다.

작업 공간은 또다른 중요 요소이다. 주요 방사선원으로부터 충분히 떨

어져 있는 원자로 격납 용기 내부의 보증된 적절한 작업 공간이 있다.

철근 콘크리트제 원자로 격납 용기(RCCV)는 보다 자유롭게 원자로 격납 용기 형태를 설계하였다.

그러므로 원자로 격납 용기 내부의 배관 및 부품 주위의 작업 공간을 마련하는 것은 매우 쉽다.

이러한 노력의 결과로 가시와자키 가리와 7호기의 최초 정기 보수 기간(first outage main·tenance)에는 총 153man·mSv의 방사선 피폭을 기록하였다.

2. 경제성 향상

가. 건설 체적에서의 경제성 향상

ABWR의 설계에서 발전소 부품들은 발전 용량(power generation capacity)이 증가되면 팽창 상태에서 수축된다.

주요 건물들의 총체적은 〈표 1〉에서 보는 바와 같이 기존의 BWR보다 24%가 감소되었다.

이것은 건물 재료에서의 감소뿐만 아니라 piping cable 및 덕트의 짧은 배치, 즉 그러한 재료의 감소를 의미한다.

또한 냉난방 및 공기 조화 계통(HVAC)의 용량은 더 작게 되었다.

공간 절약 부분은 대용량 원자로 냉각재 재순환(PLR) 펌프 및 배관을 교체시켰던 원자로 내 펌프(RIP) 도입에 의해 얻어진다.

그리고 원자로 격납 용기 내부 배

〈표 2〉 ABWR의 최초 연료 주기의 개요

	기존의 BWR(K-3)	ABWR(K-6)
상업 운전 시작	1993. 8. 11	1996. 11. 7
출력 일자	1994. 9. 9	1997. 11. 20
발전량		
시운전 시험 포함	13,518,500	16,394,928
상업 운전 시작 후	10,402,010	12,295,400
이용률(%)	99.8	99.9
보조 출력률(%)	4.0	3.2
열효율(%)	33.5	35.2

치는 콘크리트 구조의 원자로 격납 용기를 자유롭게 설계함으로써 최적화된다.

터빈 건물에 있어서 주요 터빈에 연결된 증기 배관의 side-entry 배열은 그 배열 물질 체적과 건물 체적의 길이를 감소시킨다.

시스템 앞쪽으로 퍼내어진 저고온 증기 배수(high and low heater drain)는 증기 배수(heater drain)가 ABWR의 정상 운전중에는 주요 콘덴서 아래로 더 이상 흘러내리지 않기 때문에 복수(condensate) 시스템의 용적을 보다 작게 만든다.

건물 체적이 기존의 BWR보다 더 작았지만 이런 불편함은 가시와자키 가리와 6·7호기의 처음 정기 보수 기간(first outage maintenance) 동안은 보고되지 않았다.

이것은 최근의 BWR에서 이용된 것과 같은 설계 표준이 ABWR의 원전 종합 조정에 적용되었기 때문이다.

가시와자키 가리와 원전에서 지속

적인 유니트 건설을 통하여 동경전력의 사내 설계 표준으로 개발되었던 표준은 운전과 유지 보수의 관점에서 몇 가지 필요 조건과 설계 조항을 규정하고 있다.

나. 원전 운전에서의 경제성 향상
〈표 2〉는 가시와자키가리와 6호기의 운전 기록의 개요를 나타내고 있다.

원전 운전 능력은 ABWR에서 향상되었다.

26개의 많은 제어봉이 동시에 인출될 수 있는 미세 조정 가능 제어봉 구동(FMCRD)의 gang 운전과 자동화된 원전 운전은 원전 가동 시간을 줄인다.

제어봉의 가동으로부터 정격 출력(rated power)까지는 약 25시간이 소요되는 반면에 기존의 BWR은 약 40시간이 소요된다.

FMCRD에 의한 높은 반응도로 제어봉(CR) 형태는 전력 출력에서 어떠한 변화없이 변화될 수 있다.

결과적으로 원전 이용률은 증가되

었다.

처음 출력 유지는 55일간 시행되었다.

그러나 이것은 일본의 규제가 최초 출력에서 전부분의 터빈 검사를 요구하기 때문에 ABWR 보수 유지 기간의 제한을 나타내지는 않는다.

우리는 운전 정지 기간이 차기 정기 검사에서는 단축될 것이며, 그 기간중에 원자로 설비가 일제 일정을 결정할 것으로 믿는다.

유지 보수 능력의 향상은 ABWR의 설계에서 찾게 되었다.

예를 들면 FMCRD의 주요 동체는 자유롭게 유지 보수되도록 설계되며 정기적인 교체를 필요로 하는 유일한 부분인 패킹 마개(gland packing)는 주요 동체의 가장 낮은 끝부분에 부착된 분리된 작은 틀(housing)에 위치한다.

앞에서 설명했듯이 유지 보수의 관점으로부터 요구되는 필요 조건은 원전 종합 조정(plant general arrangement)에 적용되는 우리 자신의 설계 표준에 세분화되어 있으며 access route의 폭과 높이, 가동중 검사(ISI)를 위한 적절한 작업 공간을 확보하는 이웃해 있는 파이프간의 거리, 부품의 주변 공간, operation stand를 위한 필요 조건, 부품에 걸쳐있는 hook 등을 포함하고 있다.

설계 검토는 표준이 실제의 원전 설계에 적절히 반영되었는지를 조사하는 CAD 시스템을 이용하여 시행

Unit	S/C/C/O	RPV							S/C~C/O	I/F~C/O
		S/C	I/F	C/F	C/R	H/T	F/L	C/O		
K-1	S/C 12.1.'78 C/O 9.18.'85	17.5M	7M	30M	9M	8M	10M	81.5 M	64 M	
K-2	S/C 10.26.'83 C/O 9.28.'90	23M	7.5M	26.5M	9M	7M	10M	83 M	60 M	
K-5	S/C 10.26.'83 C/O 4.10.'90	17.5M	6M	28M	9M	8M	9.5M	77.5 M	60 M	
K-3	S/C 7.1.'87 C/O 8.11.'93	15M	8M	25.5M	7M	7M	10M	72.5 M	57.5 M	
K-4	S/C 2.5.'88 C/O 8.11.'94	21M	8.5M	25M	7M	7M	10M	78.5 M	57.5 M	
K-6	S/C 9.17.'91 C/O 11.7.'96	10.5M	6M	21M	6.5M	6.5M	11.5M	62 M	51.5 M	
K-7	S/C 2.3.'92 C/O 7.2.'97	13.5M	6.5M	22.5M	8.5M	5.5M	8.5M	65 M	51.5 M	

〈그림 2〉 가시와자키 가리와 원전의 건설 기간

주) S/C: 착공, I/F: 기초 검사, C/F: 기초판 완성, C/R: 연료 저장전증, RPV H/T: 원자로 격납 용기(RPV)호기 유체정력학 시험, F/L: 핵연료 장전(10:상업 운전 시작)

되었다.

CAD 검토 회의는 동경전력과 원전 설비 제조 업체들과 공동으로 가시와자키가리와 6·7호기 프로젝트의 각 유니트당 35회 개최되었다.

유지 보수 능력은 또한 원전 건설 기간 동안 조사되었다.

충원전 검사는 다음 3단계의 건설에서 시행되었다

- ① 부지에서 원자로 압력 용기의 정수역학 시험 전
- ② 연료 장전 전
- ③ 상업 운전 시작 전

검사의 목적은 운전 및 유지 보수 관점에서 설비가 적절하게 설치된 것을 보증하는 것이었다.

3. 건설능력의 향상

가시와자키가리와 6·7호기의 공기는 각각 51.5개월이었다.

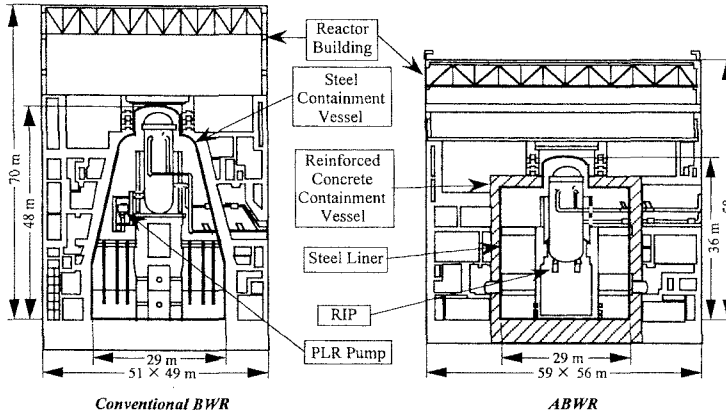
〈그림 2〉에서 보는 바와 같이 그것은 다른 기존의 BWR 유니트로부터 급격히 향상되었다.

만약 시리즈 초호기(FOAK) 설계의 조사를 위한 부가적 시험과 같은 가시와자키가리와 6·7호기에 독특

한 어떤 조건이 일정에 포함되었더라면 공기는 약 48개월이었을 것이다.

원전 건설의 이러한 향상은 ABWR의 설계 특성, 개량화된 건설 기술 및 훌륭한 프로젝트 관리에 의해 실현되었다.

ABWR 건설 계획과 중요한 관련이 있는 설계 특성은 〈그림 3〉에서 보는 바와 같이 구조적으로 원자로 건물(R/B)과 통합된 철근 콘크리트 원자로 격납 용기(RCCV)의 이용과 배치 설계(layout design)의 합리화(rationalization)를 통한 건물 체



〈그림 3〉 철근 콘크리rete 원자로 격납 용기(RCCV)와 원자로 건물

적(building volume)의 감소를 포함한다.

기존의 BWR 건설 계획에 있어서 강철 원자로 격납 용기의 설치에 임계 일정(critical schedule)의 일부분을 포함하고 있다.

원자로 격납 용기에 관한 설치 및 압력 시험 후에만 그 주위의 R/B 구조가 세워질 수 있다.

한편 RCCV는 R/B에 통합되므로 그것의 설치에 R/B의 설치와 동시에 진행된다.

이것은 공기 단축의 이점을 제공한다.

그것의 liner plate를 설치하는 데 필요한 시간은 그것의 설치에 앞서 liner의 모듈화에 의해 별충될 수 있다.

건설 방법은 가시와자키가리에서 원전의 지속적인 건설을 통하여 축적된 경험을 기초하여 향상되었다.

건설 계획의 운곽을 결정하는 2가

지 주요 방법이 있는데, 하나는 가시와자키가리와 6호기에 적용된 「All-weather 건설법」 이고, 다른 하나는 가시와자키가리와 7호기에 적용된 'Large block 건설법' 이다.

All-weather 건설법은 건설부지에서 공장에서의와 같은 환경을 창출하기 위해 설계되었다.

이러한 방법에서 R/B를 위한 강철 구조는 요구되는 일반 일정보다 먼저 조립된 후 건물 건설 구역의 양호한 작업 조건을 제공하기 위해 임시 지붕과 벽판(wall sheet)으로 덮여진다.

가시와자키가리와 6호기 건설을 위한 임시지붕은 쉽게 해체하기 위해 4조각으로 분리된다.

큰 부품은 열린 지붕을 통하여 타워 크레인에 의해 원자로 건물로 들어올려졌다.

레바(rebar)와 같은 건설 재료는 모노레일 호이스트, 임시 오버헤드 크레인 및 월 크레인과 같은 다양한

복합 운송 설비에 의해 효과적으로 내부로 운반되었다.

이러한 방법은 바람, 강수, 및 직사광선으로부터 구역을 보호함으로써 지역 부지 현장 작업의 효율, 품질 및 안전을 확보하는 데 있어 가시와자키가리와 6호기에서 효과적임을 나타내고 있다.

Large block 건설법은 공장에서의 제조 및 동시에 시행된 부지 작업의 범위를 확장하기 위해 설계되었다.

부품과 구조는 공장 또는 부지 내의 조립 공간에서 조립되거나 large block module로 통합된 후 건설 작업이 효과적으로 시행되도록 설치 장소로 운반된다.

이러한 방법은 동시에 여러 개의 작업 진행에 대한 일정을 계획할 수 있게 해준다.

RCCV 제작을 위한 일정으로 가시와자키가리와 7호기의 건설에서 최적 경로(critical path)가 이용되었다.

그리고 모듈화는 RCCV를 비롯하여 임계 일정(critical schedule)을 단축시키도록 그 내부에 최대 한도로 적용되었다.

RCCV liner plate는 그것들의 설치시 레바 작업에서 어떤 대기 시간도 야기시키지 않도록 모듈화되었고, 나서 liner는 콘크리트 타설을 위한 형태로 이용되었다.

RVP pedestal, RCCV 내부 및 RCCV 상부 슬래브는 기계적 작업과

건축학적 작업을 동시에 진행할 수 있게 모듈로 조립되었다.

이러한 작업의 효과는 또한 부지 작업을 순조롭게 하는 데에서 나타난다.

여러 개의 조립 순서가 모듈화 기술을 사용하며 동시에 놓여졌기 때문에 부지 작업의 최대 부하는 조절될 수 있었으며 작업 능력을 효과적으로 이용할 수 있게 하였다.

모듈화 건설 방법의 주요 목적은 임계 일정(critical schedule)을 단축시키는 데 있지만, 그 적용이 이득이 되는 것으로 평가되기 때문에 가시와자키가리와 7호기를 위한 건설 계획의 sub-critical part에 적용되었다.

차세대 ABWR의 개선

동경전력은 다른 BWR 운영 기관 및 제조 업체와의 협력하에 현재 ABWR을 보다 개선시키기 위해 모든 노력을 다하고 있다.

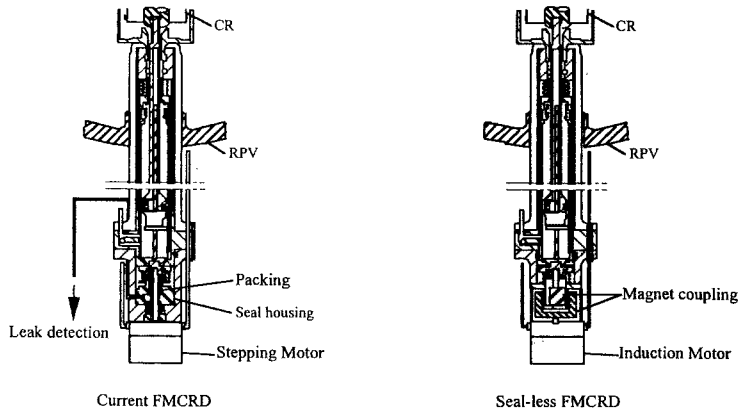
다음은 차기 ABWR 건설 프로젝트를 위한 개선 방안이다.

1. 표준화

ABWR은 국제 표준 BWR로서 개발되었다.

동경전력과 일본의 거의 모든 BWR 운영 업체들은 ABWR을 설치할 계획을 갖고 있다.

이러한 상황을 이용하여 가시와자키가리와 6·7호기로부터의 설계 변화는 시공 비용을 줄이기 위해 최소



(그림 4) 실(Seal)이 없는 미세 조정 가능 제어용 구동 장치

화되어야 한다.

우리가 같은 설계를 이용할 때 그것은 우리가 프로젝트의 시작 단계에서 원전의 모든 세부 사항을 정의할 수 있다는 것을 의미한다.

이것은 그것이 우리로 하여금 건설 방법의 더 나은 개선 또는 단독 장비의 조달 및 매우 세분화된 공유 영역(interface) 설계 정보에 기초한 보다 경쟁적인 시장으로부터의 시스템과 같은 비용 절감을 위한 더 많은 가능성을 찾도록 하기 때문에 매우 이득적이다.

건설 관리는 표준화 되도록 추구하고 있다.

모든 전력 회사는 서로 다른 관리 방법을 갖는 경향이 있으며 때때로 이것은 공급자에 있어서 추가적인 일을 야기시킨다.

동경전력은 다른 전력회사들에게 관리 방법을 표준화하도록 권유하였으며 문서 관리 프로그램과 같은 것은 이미 차기 프로젝트를 위한 표준

으로서 수립되었다.

건설 관리는 표준화된 관리 업무에 최신의 정보 기술을 적용함으로써 보다 개선되고 합리화될 것이다.

그것은 우리로 하여금 처음 ABWR의 건설을 통하여 축적된 데이터와 지식을 최대한 이용할 수 있도록 할 것이다.

2. 원전 설비의 합리화와 단순화

비록 가시와자키가리와 6·7호기로부터의 설계 변화가 차기 프로젝트에서 최소화될 것이라고 해도 현재 일부 수정이 논의되고 있다.

설계 변경에 대한 제안은 다음의 조건을 충족시켜야 한다.

① 얻어진 이익은 시공 비용에서의 불이익(engineering cost penalty)을 보상할 수 있다.

② 새로운 설계는 표준화될 수 있다. 예를 들면 FMCRD의 패킹 마개(gland packing)는 (그림 4)에서

보는 바와 같이 seal이 없는 magnetic coupling으로 교체되도록 설계되고, 그것의 stepping motor는 유도 전동기(induction motor)로 교체될 것이다.

그것들은 seal-less coupling이 누출 보호 관계통(leak detection piping)과 감시 카메라를 제거시키고 유도 전동기는 stepping motor보다 저렴하기 때문에 시공 비용에서의 불이익(cost penalty)을 보상할 수 있는 충분한 이익을 갖고 있다.

설계는 현재 일본의 전력 회사들과 제조 업체들의 공동 연구 프로그램에서 논의 및 시험되고 있다.

3. 건설 방법에 대한 개선

건설 일정은 건설 방법을 개선함으로써 단축시키도록 추구하고 있다.

가시와자키가리와 6·7호기 프로젝트에서 축적된 데이터를 기초로 하여 우리는 건설 기간이 건설 방법의 주요 변경 없이 45개월 이하가 될 것이라고 믿고 있다.

그리고 그것은 우리가 large block modular 건설 방법을 보다 향상시키고 차기 프로젝트에서 그 적용 영역을 확대할 때는 43개월 이하로 될 것이다.

ABWR의 개선과 신형화

ABWR-II로 불리는 2010년대에

건설될 차세대 ABWR을 위한 연구 개발 프로그램은 현재 진행중에 있다.

이 프로그램은 90년 동경전력에 의해 준비된 필요 조건 문서(requirement document)와 함께 시작되었으며 일본의 전력 회사들과 BWR 제조 업체들에 의한 공동 연구가 이루어졌다.

우리는 지금 총체적 원전 개념(overall plant concept) 개발 단계에 있다.

차세대 원자로를 위한 안전성 표준에 관한 국제 논의가 고려되고 있는 동안에 향상된 경제성을 갖는 개량형 원자로로서 ABWR-II 원전 개념은 현재 새로운 설계 특성을 도입하고 1,700MW까지 발전 출력을 증가시킴으로써 개발되고 있다.

원자력 발전의 증흥에 관한 사회적 합의를 얻는 데 필수 요소의 하나는 원자력이 다른 발전 방법보다 경제적으로 뛰어나다는 것이다.

최근 원유 가격의 하락은 화력 발전 단가를 절감시켰다.

또한 혼합 연료 주기(combined cycle)에서의 열효율은 최근 몇 년 동안 화력 발전 단가를 절감시키고 있다.

비록 화력 발전 단가가 상승되지 않는다 하더라도 미래에 있어 원자력의 경제적 이득을 보충하기 위해서 ABWR-II의 건설 단가는 ABWR에서보다 30% 절감을 목표로 하고 있

다.

발전 단가에 관해서 비용을 절감시키는 가장 효과적인 방법의 하나는 이용률의 향상이며 ABWR-II는 93% 이상을 목표로 하고 있다.

〈그림 5〉는 ABWR-II의 개념적인 이미지를 나타내고 있다.

ABWR-II를 위한 기술적·경제적 가능성에 대한 논의는 현재 확대되고 있다.

가. 대용량 핵연료 다발

현재의 BWR 격자(lattice)보다 1.5배 더 큰 피치(pitch)를 갖는 K-격자 핵연료다발이 연구되고 있다.

규격의 증가는 핵연료 설계에 좀 더 유연성을 줄 것이다.

그것은 또한 연료 재장전 출력 기간을 단축시키는 이점을 갖는다.

나. 기능에 의한 제어봉 구동

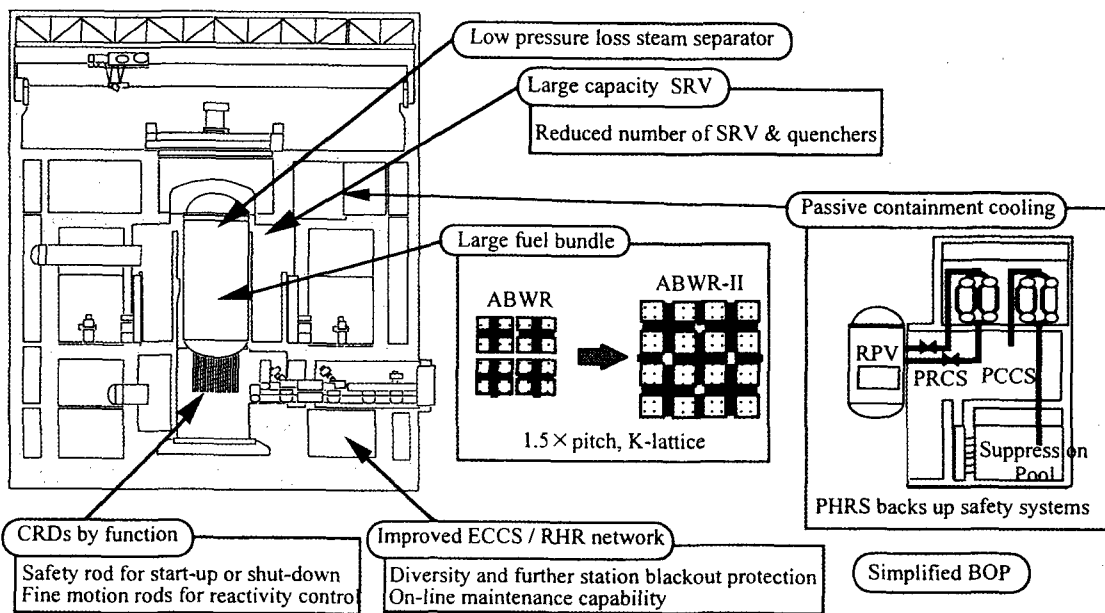
제어봉 구동(CRD)은 시작 또는 정지만을 위한 안전봉과 반응도 조정을 미세 조정 가능봉의 2가지 유형으로 분류된다.

이것은 요구되는 기능에 따라 미세 조정 가능 제어봉 구동(FMCRD)을 단순화시킨다.

다. 저압력 손실 증기 분류기

분류기 피치(pitch)와 설계는 압력 손실을 약 20% 줄이도록 수정될 것이다.

새로운 분류기는 원자로 재순환 시스템에서의 압력 손실을 줄일 것



(그림 5) ABWR-II 개념도

이다.

라. 대용량 안전 방출 밸브

안전 방출 밸브와 quencher의 수를 줄이기 위해 대용량 안전 방출 밸브(SRV)에 관한 가능성 연구와 일부 기본 시험이 현재 시행되고 있다.

마. 피동형 원자로 격납 용기 냉각

피동형 증기 제거 시스템(PHRS)은 설계 기준 사고(DBA) 한계를 넘는 상황에서 현재의 안전 시스템을 지원해주는 후보 시스템이다.

피동형 증기 제거 시스템은 past isolation condensor와 비슷한 증기 교환기를 갖는 원자로 냉각 시스템(PRCS)과 피동형 원자로 격납

용기 냉각 시스템(PCCS)의 2개 하부 시스템으로 구성된다.

바. 개량된 ECCS/PHR 네트워크
변화와 발전소 정전 사태의 대비는 자체 발전기가 있는 ARCIC와 GTG를 이용함으로써 수행될 것이다.

더 이상의 최적화는 현재 짧은 기간의 출력을 지원하기 위해 유지 보수 작업 부하의 절감뿐만 아니라 안전성 향상의 관점에서 논의된다.

사. 단순화된 보조 설비 부문
보조 설비 부문(BOP)의 시스템과 부품을 단순화하기 위해 시드(seed) 기술에 관한 범세계적인 조사가 수행되었다.

결론

경수로는 21세기에 있어서 오랜 기간 동안 계속하여 원자력 발전에 있어 중요한 역할을 할 것이다.

그러한 신념을 갖고 동경전력은 개량형 BWR 원전 개발에 있어 선두 역할을 다하였다.

ABWR은 가시와자키가리와 6·7호기의 건설과 운전을 통하여 그 우수성을 보여주었다.

당면한 건설 프로젝트와 미래의 발전소를 위한 개선 작업이 현재 진행중에 있다.