

《기술보고》

원전 1차계통 방사선량 감소를 위한 코발트 합금 대체기술 개발

한정호 · 이덕현 · 노계호

한국원자력연구소

정양근

한국전력공사

(1994. 1. 14 접수)

요 약

경수로형 원전에서 발생하는 작업종사자에 대한 피폭선량의 약 90%는 1차계통내 재질성분으로 부터 방사화되는 코발트 핵종에 기인한다. 원전 선진국에서는 이러한 코발트 생성원을 근원적으로 제거하여 1차계통내 방사선량을 획기적으로 감소시킬 목적으로 Co reduction program을 중점적으로 추진하여 왔으며, 이중 계통내 코발트 주생성원인 각종 밸브재질을 저 Co 또는 Co-free 합금으로 대체시키는 기술이 이미 상당한 수준에 이르렀다. 국내의 건설예정 원전에 있어서도 이러한 기술개발의 적용에 대한 검토가 요구되고 있는 점을 미루어 볼 때, 머지 않은 장래에 국내 원전에 대한 이 기술의 적용이 불가피할 것으로 보여진다. 본 기고문에서는 원전 1차계통내 밸브의 코발트 합금재질 대체기술과 관련된 내용을 중점적으로 소개, 검토하고자 한다.

1. 서 론

원전 1차계통내 부식생성물의 생성과 이의 방사화로 인한 작업종사자의 방사선 피폭은 불가피한 현상이나, 운전기술의 향상과 1차계통 수질관리의 개선 등을 통하여 계통내 방사선량 감소에 상당한 효과를 거두어 왔다. 그러나 최근 원전 작업종사자의 연간 허용피폭량을 5rem에서 2rem으로 낮추도록 권고하고 있는 ICRP 60의 공표와 신규 원전 설계시 ALARA 개념이 도입되고 있지 않다는 규제기관의 지적 등에서 알 수 있듯이, 더욱 엄격해 지는 방사선 관리규정에 대해 능동적으로 대처할 수 있는 새로운 기술의 개발이 절실히 요청되고 있는 실정이다.

원전에서 발생하는 작업종사자에 대한 피폭선량의 약 90%는 1차계통내 재질성분으로 부터 방사화되는 코발트 핵종에 기인한다. 계통내 방사선량의 제어는 잘 알려져 있는 바와 같이, 계통내 표면에 침적되어 있는 방사화 물질의 제염, 부식생성물의 생성, 이동 제어를 위한

고 pH 수질관리, 냉각재내 부유 방사화 물질 제거를 위한 미세여과재 적용 등의 기술에 의하여 관리되고 있다 [1]. 그러나 이러한 다양한 기술의 적용에도 불구하고, 방사선량 감소목적의 효율적 달성이라는 측면에서 이들 기술이 갖는 고유한 취약성으로 인해 한계성이 노정되어 왔다.

따라서 80년대 초부터 원전 선진국에서는 코발트 생성원을 근원적으로 제거하여 1차계통내 방사선량을 획기적으로 감소시킬 수 있는 Co reduction program을 중점적으로 추진하여 왔다 [2]. 이중 계통내 코발트 주생성원인 각종 밸브재질을 저 Co 또는 Co-free 합금으로 대체시키는 기술을 꾸준히 개발하여 왔으며, 일부 발전소에 대한 적용으로 부터 상당한 효과가 입증되는 등 현재 미국, 독일 등을 중심으로 개발되고 있는 코발트 합금재질 대체기술의 수준은 안정화 단계에 이르고 있다. 국내 원전의 경우에 있어서도 건설예정 경수로형 원자로와 앞으로 계획되고 있는 신형로 및 차세대형 원자로에 대한 이 기술의 적용이 불가피할 것으로 판단되

로 기존 코발트 합금 및 저 Co/Co-free 합금재질의 특성평가, 1차계통 밸브의 설계요건 및 안전성 검토, 방사선량 저감에 미치는 소재영향 평가 등과 같은 요소기술 개발 분야를 체계적으로 진행시켜 국내 원전의 코발트 합금재질 대체기술 적용을 위한 종합적인 대책이 수립되어야 한다고 본다.

2. PWR 1차계통내 코발트 핵종의 생성과 이의 감소 대책

2.1. 코발트 핵종의 특성과 생성

PWR 원전 1차계통내에 존재하는 방사성 핵종 중 작업종사자에 대한 피폭선량의 기여가 가장 큰 핵종은 Co-60과 Co-58이다. 각 원전별 설계특성 및 운전이력에 따라 다소간의 차이는 있으나, 대체로 피폭선량의 약 90% 정도가 이들 핵종에 의한 것으로 밝혀지고 있다. 국내 고리 1호기에 대해 1차 냉각재 계통 중 코발트 핵종의 분포특성을 조사한 결과에 의하면 [3], 10주기 재장전 기간 중 채집한 부유 CRUD의 화학성분 중 코발트 핵종이 차지하는 비율이 0.2wt% 이하로 매우 낮은 값에 불과하나 방사능량에 있어서는 전체 방사능량의 94%를 차지하고 있는 점으로부터 계통내 피폭선량에 미치는 코발트 핵종의 기여도를 쉽게 알 수 있다.

Co-58은 증기발생기 전열관이나 핵연료 집합체 spacer grid 등의 재질속에 함유되어 있는 니켈성분으로부터 $[Ni^{58}(n, p) Co^{58}]$ 반응으로 생성되고, 반감기가 72일이며 방출에너지는 0.81MeV로서, 운전 첫 주기에 특히 중요한 핵종이다. 즉, 가동초기에는 Co-58이 전체 방사능 중 차지하는 비율이 Co-60 보다 크거나 같지만 시간이 지날수록 반감기가 긴 Co-60이 전체 방사능의 대부분을 차지하게 된다. 한편 Co-60은 자연적으로 존재하는 유일한 동위원소인 Co-59가 열 중성자와의 $[Co^{59}(n, \gamma) Co^{60}]$ 반응으로 생성되는 핵종으로서, 원전 운전기간 중 작업종사자에 대한 주 피폭원으로 작용한다 [1]. 이 핵종의 반감기는 약 5.26 년이며 방출에너지는 1.17MeV, 1.33MeV로 1차계통 재질 중 Stellite 6와 같은 합금성분이나 오스테나이트 및 페라이트 강, 니켈계 합금 등의 구조재로부터 용출되어 나오는 부식생성물과의 반응으로 생성된다.

코발트(Co-59)는 1차계통 부품재질 중 증기발생기 전열관, 핵연료 spacer grid 등의 니켈 합금과 원자로

내부 부품, 배관재 등의 스테인레스 강 중에 불순물로서 존재하며, control rod drive mechanism(CRDM), 밸브 및 베어링 등 내마모성이 요구되는 부품에는 주 합금원소로 사용되고 있다. 이러한 코발트 합금 중 대표적인 것은 코발트를 50-60% 함유한 Stellite 합금으로서 내마모성이 요구되는 부품의 표면에 용접에 의한 경면(hardfacing)으로 처리되어 사용된다 [4]. 이들 부품으로부터 방출되는 코발트 양이 1차계통내 전체 코발트 방출량 중 차지하는 비율은 발전소마다 각기 다르며 분석결과도 다양하나 종합적으로 볼 때, 증기발생기 전열관의 부식, CRDM 및 밸브의 마모 및 부식이 주된 요인인 것으로 알려져 있다. 실제 발전소 가동조건에서 얻어지는 자료가 불충분하기 때문에 현재 EPRI에서는 실제 발전소의 부식방출 데이터 및 마모율 측정치를 얻기 위한 연구를 수행 중이다.

2.2. 코발트 핵종의 감소대책

표 1의 경수로 1차계통내 코발트 생성원에 대한 자료로부터 대부분의 코발트가 증기 발생기 전열관과 계통내 밸브 재질로부터 방출되고 있음을 알 수 있다 [5]. 특히 밸브에서 방출되는 코발트는 원자로의 기동시 및 가동중의 마모와 부식에 의해서 뿐만 아니라 연삭 또는 구멍 뚫기 등과 같은 보수작업에 의해서도 냉각수 중으로 녹아 들어간다. 따라서 Co-60의 생성원인 Co-59를 줄이기 위해서 원전 1차계통 부품 중 코발트 합금의 경우는 타합금을 개발하여 대체시키고 불순물로 들어가는 경우는 이를 줄이기 위한 재료연구가 수행되고 있다.

표 1. PWR 원전의 코발트 합금 생성원

Source	Annual Release Rate/ Plant (g/ yr)
S/G Tube Corrosion	33-55
Valve Maintenance	10-30
CRDM Wear	2-5
Check Valve Wear	1
Gate Valve Wear	0.5
Main Coolant Pump Shaft Wear	0.2

코발트 경면 합금인 경우 이를 대체할 철 또는 니켈계 합금에 대한 연구가 활발히 진행 중이며 개발합금의 일부를 원전에 실제 적용한 결과 우수한 특성을 갖는 것으로 판명되었다[2]. 또한 1차계통내의 스테인레스 강도 부식으로 코발트를 방출하여 Co-60을 생성하므로 성분 중 코발트 불순물을 줄이기 위한 대체 재료를 개발 중이다. 증기발생기 전열관 재료를 인코넬 600으로 부터 인코넬 690으로 교체함으로써 코발트 불순물을 0.04%에서 0.015%로 감소시킬 수 있으며 핵연료 spacer grid도 인코넬 합금 대신 Zircaloy를 사용하는 경우 Co-60의 발생을 25-50% 정도 줄일 수 있다[1]. 이밖에 EPRI 등에 의해 제시되고 있는 1차 냉각수의 고 pH 운전, 1차계통 냉각재와 접하는 재료의 표면처리, 화학적 제염처리 등의 방법이 원전 1차계통의 방사능 축적을 억제하는데 효과적인 기술로서 알려져 있다[1].

3. 1차계통내 밸브재질 대체기술

3.1. 재질대체 대상 밸브 선정

원전 1차계통 코발트 합금 재질대체에 있어서 우선적으로 수행되어야 할 것은 원자로 냉각재 계통내로 유입되는 코발트의 생성원으로 작용하는 밸브를 EPRI 등에 의해 제시되고 있는 그림 1의 기준에 따라 선별해야 하는 것이다. 이의 일반적 절차와 평가방법은 다음과 같다. 계통도를 기초로 하여 각 기기들이 어떠한 기능을 하는지 파악한 다음, 부식, 침식, 마모 또는 보수 등에 기인되어 원자로 냉각재 계통과 노심내로 코발트를 방출하는 밸브들을 찾아내고 설계도와 기술설명서를 참고

하여 high-Co 합금을 사용하는 밸브의 위치를 확인해야 한다. 따라서 원칙적으로 노심으로 연결되는 계통내의 모든 밸브가 교체대상 후보이나, 계통내에 설치된 필터나 탈염기에 의한 용해성, 입자성 코발트의 제거효율이 높다고 판단될 경우 그 전단에 설치되어 있는 밸브는 교체 대상에서 제외될 수 있다.

각 밸브의 부식, 마모, 침식 및 보수로 부터 야기되는 코발트의 방출속도는 적절한 방법[5-8]을 이용해서 평가한다. 이러한 평가를 수행하는데 있어서 노내로의 코발트 유입 가능성이 있는 표면 덧씌우기(lapping) 등과 같은 표면 재처리(resurfacing)의 빈도수에 대한 평가도 포함되어야 한다. PWR 밸브의 경우 마모에 의해 방출되는 코발트량을 평가하는 방법은 크게 두가지로 요약된다. 첫번째는 밸브 형태를 기초로 하여 평균 마모속도를 계산하는 것으로서, 실제 마모를 경험하는 밸브에서 high-Co 합금이 차지하는 표면적의 분율과 25~50mg/dm²·mo로 제안된 코발트 마모속도를 사용해서 각 밸브의 마모로 부터 유출되는 실효 코발트량을 구해내는 것이다. 둘째는 코발트가 많이 유출될 것으로 생각되는 특정 밸브의 최대 마모량을 정량적으로 측정하는 것이다. 즉, 실제 마모량을 측정하고 이 값을 high-Co 합금이 차지하는 면적으로 나눔으로써 실효 코발트 방출속도(effective cobalt release rate)를 구해내는 것이다.

표 2는 위의 두가지 방법으로 얻어진 코발트의 마모속도를 비교한 것이다. 게이트 밸브(gate valve)에서 측정된 코발트 마모속도는 계산치의 1/3이었고, 반면에 체크 밸브(check valve)의 경우 측정치가 계산치보다 5배 정도 큰 것으로 나타났다. 글로브 밸브(globe valve), 스프레이 밸브(spray valve) 및 버터플라이 밸브(butterfly valve)에 대한 마모속도는 실제로 측정되지 않았으나, 일반적으로 글로브 밸브의 마모속도는 게이트 밸브와 비슷하고 스프레이와 버터플라이 밸브는 체크 밸브와 대체적으로 유사한 것으로 평가된다. 마모속도는 밸브가 물 분위기에 노출되어 가동된 기간내에서만 평가된다. 예를 들면 잔열제거 계통(residual heat removal system)은 연간 1~2개월 동안만 가동되기 때문에 이 계통내의 밸브 마모속도는 해당기간내에서만 고려되어야 한다. 그밖에 리프트 체크 밸브(lift check valve)와 피스톤 체크 밸브(piston check valve)는 설계상의 유사성 때문에 글로브 밸브와 마모속도가 거의 동일하다고 가정된다[9]. 그리고 계통내의

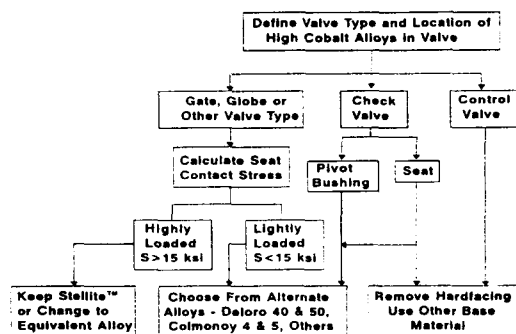


그림 1. 코발트 합금 재질대체 대상밸브 선정 절차도

표 2. 2가지 측정방법에 의한 각종 밸브의 코발트 마모속도 비교

Valve Type	Calculation			Measured
	% Area in Contact	Assumed Co Input(mdm)	Effective Co Wear Rates (mdm)	Effective Co Wear Rates (mdm)
Gate	12	25-50	3.0-6.0	1.0-2.0
Swing Check	3	25-50	0.75-1.5	4.5-8.0
Globe	1	25-50	0.25-0.50	-
Spray	17	25-50	4.25-8.5	-
Butterfly	3	25-50	0.75-1.5	-

직경이 작은 밸브들의 경우(vent /drain valve 등) 그 하단이 원자로 냉각재계통과 연결되어 있지 않다면 단지 냉각재에 노출된 high-Co 합금부분 만을 고려하여야 한다.

이러한 평가와 더불어 제염 등의 영향이 포함되지 않는 실제 코발트량 감소만에 의한 계통내 방사선 준위의 감소 평가(표 3 참조)와 경제성 분석이 반드시 수행되어야 한다. 즉, 코발트합금 교체와 관련된 비용과 방사선 피폭에 따른 비용 그리고 비용 /이익(cost /benefit) 분석을 수행하여 실제 경비절감 효과를 평가해야만 한다. 표 4는 위의 평가기준을 종합하여 밸브의 형태와 위치에 따라 정해진 교체 대상 밸브의 우선순위를 나타낸 것이다.

3.2. 대체재질의 자격인증(Qualification)과 안전성[2]

앞서 그림 1에서 살펴본 바와 같이, 모든 밸브에 high-Co 합금의 경면처리가 반드시 필요한 것이 아니라 밸브의 형태와 기능에 따라 저 Co 또는 Co-free 합금이 사용될 수 있음을 알았다. 이러한 대체합금이 밸브 경면처리에 적합한지의 여부를 평가하기 위해서는 일차적으로 마모 저항성, 침식-부식 저항성, 내식성, 마찰계수 그리고 경도, 인성, 충격 저항성 등의 기계적 성질과 열팽창성, 용접성과 보수성, 가공성 등과 같은 많은 물성이 검토되어야 한다. 위에 열거한 특성을 만족하는 것 이외에 대체합금이 실제 적용에 있어서 만족스러운 성능을 발휘한다는 것을 입증하기 위해서는 충분한 발전

소 실증 시험과 루프시험을 거쳐야 한다. 이러한 시험은 실제 밸브가 경험하는 조건과 같거나 그보다 가혹한 조건에서 수행되어야 한다. 내식성과 같이 시간 의존적인 특성을 평가·입증하기 위해서는 충분한 시간동안 시험되어야 하며, 열적 또는 기계적 부하주기(loading cycle)는 설계수명과 동등하거나 그 이상의 주기로 시험되어야 한다. 특별한 용도로 사용될 대체합금의 적용을 위해 필요한 특성시험의 정도는 발전소와 부품에 따라 다르다. 경우에 따라서는 대체합금의 사용으로 인해 위험 발생율이 적고 보수를 위한 접근이 용이할 때가 있다. 이러한 경우에는 방대한 자격인증 시험이 필요하지 않을 수도 있다. 그러나 그 반대의 경우에는 여러가지 많은 자격인증 시험이 요구된다.

1차계통 부품중 코발트 경면합금을 다른 재료로 대체하여 사용하려는 경우, 미국 NRC의 10 CFR 50.59 규

표 3. 코발트 생성원 감소에 따른 Co-60과 방사선량의 감소

Year	% Co-60 Remaining	% Dose Remaining
1	88	91
5	52	64
10	27	45
15	14	36
20	7	30

표 4. 코발트 재질대체 대상 밸브의 우선순위

Rank	Type	System - Location	Remarks
1	Globe - Flow Control	CVCS - Downstream of demineralizer	Used in charging line - subject to high wear.
2	Spray	RCS - Pressurizer	Cobalt can indirectly enter primary coolant.
3	Check	CVCS - Downstream of demineralizer	Used in charging line : Check valves show high wear.
4	Check	RCS - Safety Injection System Interface	Check valves show high wear plus relatively large area for corrosion.
5	Gate	RCS & CVCS Downstream of demineralizer	Gate valves show moderate wear and corrosion.
6	Globe		Globe valves estimated to show moderate wear and corrosion.
7	All Types	CVCS - Before demineralizer, RHRS, Boron Injection, Sampling System	Most cobalt removed by demineralizer. System used infrequently. Small amount of cobalt hardfacing used.

정에 의거, 미검토 안전성 문제(Unreviewed Safety Issue : USI)가 존재하지 않음을 입증해야 한다. 만약 USI가 있으면 재질교체의 타당성을 입증할 많은 자료가 필요하고 인. 허가 갱신 문제도 야기될 수 있어 상당한 어려움이 따른다. 부품재질의 교체 또는 이와 관련한 실험에 다음과 같은 USI가 포함될 수 있음을 고려해야 한다.

- 1) 발전소의 안전성 분석보고서(Safety Analysis Report)에서 검토된 안전성에 관련한 사고의 발생 가능성이나 그 영향 또는 장비의 고장 등이 증가할 가능성
- 2) 안전성 분석보고서에서 검토된 사고나 장비고장 이외의 다른 유형의 사고나 고장의 가능성
- 3) 기술시방서에서 규정한 안전여유도가 감소할 가능성
밸브의 안전성에 관련한 필수적인 기능에는, 비정상 상태에서의 밸브의 개폐와 냉각수 유출 차단이 두가지 기능이 있다. 대부분의 밸브는 첫번째의 기능과 관련된 안전성의 확보가 요구되는 것으로서 이와 같은 밸브 개폐 기능의 원활한 작동을 위해서는 밸브 경면의 충분한

galling 저항성이 요구된다. 또한 그 밖의 기능으로서 밸브 시트 표면이 냉각수 유출을 효과적으로 차단시키는 것으로서 이때에는 galling 저항성 뿐만 아니라 마모 및 부식에 대한 저항성이 필요하다. 다른 계통의 밸브의 경우는 정상적인 가동기능과 유지기능을 만족시키면 되며 밸브 몸체가 압력을 받는 부품인 경우를 제외하고는 NRC의 규제를 받지 않는다.

또한 코발트 합금을 대체할 대상 밸브가 반드시 코발트 합금의 경면만을 사용하도록 규정되어 있는지를 최종 안전성 분석보고서 상에서 확인해야 하며, 만일 그러한 경우에는 전반적인 평가가 수행되어야 한다. 반면 코발트 경면합금을 사용하는데 특별히 요구되는 기능이 없는 경우는 FSAR의 개정이 필요하다. 한편 밸브의 경면은 사용중 압력이 가해지는 부분이 아니므로 ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Section III의 요구사항을 만족시켜야 하는 것은 아니다. 이상과 같이 코발트 합금의 경면을 다른 재료로 교체하려는 경우는 다음의 세가지 접근방식을 통하여 USI가 존재하지 않음을 입증해야 한다.

- 1) 많은 경우의 밸브에서, 우수한 galling 저항성이 요구되는 경면이 불필요함을 보여 주어야 한다.
- 2) 안전성에 관한 기능이 요구되는 경우, 대체합금이 기존의 코발트 합금과 대등한 성질을 가졌음을 보여야 한다.
- 3) 대체합금의 경면이 기존의 코발트 경면합금 밸브에서 요구되던 일반적 특성을 가졌음을 보여야 한다.

3.3. 저 Co 및 Co-free 합금개발 현황

현재 원자력 발전소의 밸브재료로 이용되거나 혹은 개발된 경면합금은 코발트 원소의 함량에 따라 고 Co 합금, 저 Co 합금, 그리고 Co-free 합금으로 분류된다. 표 5는 이들 경면합금의 화학조성을 분류 요약한 것이다 [2].

고 Co 합금은 코발트 원소의 함량이 15%이상인 합금을 말하며, 원전 밸브의 대표적인 경면합금인 Stellite 6를 비롯하여 Stellite 6B, Stellite 21 등의 Stellite계 합금과 Haynes 25, Haynes 36, Co-156, 그리고 Co-12 합금 등이 여기에 속한다. Stellite 6는 Cabot사에서 사용하고 있는 Co-Cr-C-W 합금의 상품명으로 1930년대에 Haynes에 의해 개발되었고[10], 현용 밸브의 경면합금으로 가장 많이 사용되고 있다. 저 Co 합금은 1~15% 코발트 원소를 함유한 합금으로, Haynes 711, Haynes 716, Haynes N6 등의 니켈계 합금과 RHDIIG, Tristelle 1, 그리고 Tristelle 2 등의 철계 합금이 여기에 속한다. Co-free 합금은 코발트 원소의 조성이 1% 이하인 합금을 말하며, 이들 합금은 다시 니켈계 합금과 철계 합금으로 분류된다. 니켈계 합금에는 Deloro-Cabot사에서 개발한 Deloro 40과 Deloro 50을 비롯하여 Cobex 545, Cobex 547, Colmonoy 4, Colmonoy 5, Eutroloy 등이 있다. 철계 합금은 1차계통 코발트 합금의 대체재료로 가장 관심 있게 고려되고 있는 합금으로서, 미국의 EPRI와 AMAX에서 개발한 NOREM, 독일의 Thyssen Edelstahlwerke사에서 만든 Everit 50, 오스트리아 BOHLER Schweisstechik사의 Antinit DUR 300, 그리고 프랑스의 CEA와 LAMEF가 공동 개발한 Cenium 합금이 있다. 그리고 그 외에 Stooddy Deloro Stellite사에서 개발한 EB5183과, NITRONIC 60, RHDIC 등이 Co-free 철계 합금에 속한다.

이러한 합금들이 원자력 발전소 1차계통내 밸브의 경

면합금으로 사용되기 위해서는 우수한 내마모성, 내부식성, 용접성, 그리고 경도, 열충격, 열팽창 등의 기계적 특성이 요구된다. 본 내용에서는 이러한 제반 성질 중 경면합금을 선택하는데 있어서 가장 중요하게 고려되어야 하는 마모 저항성 및 중요한 기계적 특성에 대해서만 기술하기로 한다. 이들 합금 성질의 비교에 있어서는 고 Co 경면합금이 기준이 되고 있는데 그 이유는 고 Co 합금들이 광범위한 분야에서 성공적으로 사용되어 왔기 때문에 그 제반 물성에 관한 데이터가 새로운 경면합금 재료를 선정·평가하는데 있어서 기준으로 사용될 수 있기 때문이다.

3.3.1. 마모 저항성[11-17]

원전 밸브에 사용되는 경면 합금에서 일어나는 주요 마모손상의 종류에는 응착마모(adhesive wear), 침식(erosion), 연삭마모(abrasive wear), 표면피로(surface fatigue) 등이 있는데 이중 연삭마모와 표면피로는 원전 밸브에서 크게 중요치 않은 마모형태이다.

두 재료의 접촉표면이 미끄러질 때 발생하는 접촉응력이 큰 경우, 이때 사용되는 경면합금은 galling 마모에 대한 높은 저항성을 가져야 하며, 유체의 유동이나 큰 압력차가 존재하는 분위기에서 작동되는 게이트 밸브가 이 경우에 해당된다. 그 다음 중요한 것은 침식에 대한 저항성인데, 특히 높은 압력차를 갖고 거의 닫힌 상태로 가동되는 밸브라든지 유량조절 밸브 등에서 이 형태의 마모저항성이 중요하다.

3.3.1.1. 응착마모 저항

응착마모는 접촉면에서 재료들간의 결합(bonding) 및 이동(transfer)에 의해 일어나며, 이러한 형태의 마모가 심한 경우를 galling이라 한다. 응착마모 저항성, 특히 galling에 대한 저항성은 고하중을 받는 밸브에 사용되는 경면합금에 필수적으로 요구되는 특성이다. 시트와 디스크와 같은 마찰표면에 과도한 마모와 galling이 일어나면 규정치 이상의 누수가 일어나든지 밸브의 고장이 발생된다. 응착마모와 galling에 대한 재료의 민감성은 재료 고유의 성질인 경도, 가공경화 속도, 그리고 접촉압력, 온도, 화학조건, 표면 변형, 표면 피막의 특성, 마찰계수, 결합의 용이도 등과 같은 여러 변수에 의존하게 된다. 응착마모 및 galling 실험 결과에 기초한 경면합금별 특성을 요약하면 다음과 같다.

5~8 ksi 정도의 낮은 접촉하중에서 Colmonoy 84,

표 5. 각종 경면합금의 화학조성

Alloy	Cr	Ni	Fe	Co	C	Mn	Cu	W	Si	B	Mo	Other
Base Material Used as Trim Material												
Aus. SS	18-20	8-10.5	bal	.12-.18	.08 max	2	--	--	--	--	--	--
410 SS	12	--	bal	--	.11	.46	--	--	.44	--	--	--
420 SS	13.6	--	bal	--	.36	.39	--	--	.38	--	--	--
440C SS	17	--	bal	--	.07	1 max	--	--	1 max	--	.75 max	--
17-4 PH	16.2	4	bal	--	.05	.68	4.3	--	.47	--	--	Cb+Ta .35
Inconel 600	14-17	72 min	6-10	.02-.08	.15 max	--	.5	--	--	--	--	--
Inconel 625	20-23	58 min	5 max	.05-.10	.10 max	--	--	--	--	--	--	--
Cobalt-Based Hardfacing Alloys												
Stellite 6	33	3	3	55	1.1	--	--	6	--	--	--	--
Stellite 6B	30	3	3	53	1.1	2	--	4.5	2	--	1.5	--
Stellite 21	27	2.8	--	65	.25	--	--	--	--	--	5	--
Haynes 25	20	10	3	50	.07	1.5	--	15	1	--	--	--
Haynes 36	18.5	10	2	56	.4	--	--	15	--	.03	--	--
Co-156	29	3	0.75	bal	1.6	1	--	4.5	1.2	--	1	--
Co-12	30	2.5	2.5	bal	1.4	.25	--	8	1.7	--	1	--
Cst Mtl's 6	28	3	3	bal	1.2	.5	--	4	1.5	--	1	--
Low Cobalt (1 to 15%) Hardfacing Alloys												
Haynes 711	27	bal	23	12	2.7	1	--	3	1	--	8	--
Haynes 716	26	bal	29	11	1.1	1	--	3.5	1.5	.5	3	--
Haynes N6	29	bal	3	3	1.1	1	--	2	1.5	.6	5.5	--
RHDIG	28	38	bal	11.5	1.5	--	--	2.5	--	--	4	--
Tristelle 1	30	10	bal	12	1	--	--	--	5	--	--	--
Tristelle 2	35	10	bal	12	2	--	--	--	5	--	--	--
Cobalt Free (< 1%) Hardfacing Alloys - Nickel Based												
Cobex 545	27.5	bal	8	--	1.3	1	--	7	1.5	--	7	Al-1.5
Cobex 547	27.5	bal	7	--	1.5	1	--	7	1.5	--	7	Note 1
Colmonoy 4	10	bal	2.5	--	.45	--	--	--	2.25	--	--	--
Colmonoy 5	11.5	79	4.25	--	.65	--	--	--	3.75	2.5	--	--
Colmonoy 6	13.5	74	4.75	--	.75	--	--	--	4.25	3	--	--
Colmonoy 74	10.4	bal	2.5	--	.48	--	--	4	2.5	2.1	--	--
Colmonoy 84	29	bal	1.5	--	1.1	--	--	7.5	1.95	1.3	--	--
Deloro 40	7.5	bal	1.5	--	.35	--	--	--	3.5	1.7	--	--
Deloro 50	12	bal	3.5	--	.6	--	--	--	3.5	2	--	--
Eutroloy	28	bal	1	.2	1.7	--	--	.2	1	.1	8	--
Lurgi 4500	31	bal	3	--	1.3	--	--	9	2.1	1.1	--	--
Tribaloy T700	15.5	bal	--	--	.08	--	--	--	3.4	--	32.5	Note 2
Cobalt Free (< 1%) Hardfacing Alloys - Iron Based												
Antinit DUR 300	21	8	bal	--	.12	6.5	--	--	5	--	--	--
Cenium	24-28	30-34	bal	.3	1-7	3	--	3-5	2	.9	6-8	Note 3
Cenium Z 20	27	18	bal	--	.3	--	--	2	--	--	--	<5
EB5183	20	10	bal	--	2	--	--	--	5	--	--	Nb-8
Everit 50	25	--	bal	--	2.5	<1	--	--	<.5	--	3.2	V-.5
NITRONIC 60	16.5	8.5	bal	--	.10 max	8	--	--	4	--	--	N-.14
NOREM B1	24.7	4.02	bal	--	1.03	7.79	--	--	4	--	1.99	N-.26
NOREM B4	24.8	8.05	bal	--	1.05	12	--	--	3.11	--	1.96	N-.23
RHDIC	28	--	bal	--	1.5	--	--	1.5	5.17	--	1.5	--
SKWAM	17.5	--	bal	--	2	.55	--	--	1.5	--	1.1	--

Note 1: Al-1.5, V-4 2: Co+Fe=3 max 3: Nb/Ta-3, Zr-3, V-3

Colmonoy 74, Deloro 40, Antinit DUR 300, Everit 50 등의 Co-free 합금들은 Co계 합금의 물 분위기 마모 시험시 얻어지는 것과 거의 동일한 마모 특성을 나타낸다. 따라서 글로브 밸브와 체크 밸브 및 높은 압력차에서 개폐되지 않는 게이트 밸브에서는 이러한 Co-free 경면합금들이 만족스러운 성능을 보인다.

중간정도의 접촉하중(15 ksi)에서 Colmonoy 84, Deloro 40, RHDIC, Tribaloy T700, Vertex 4776 등의 Co-free 경면합금들과 고 Co 합금을 한쌍으로 하는 이중 재료간의 표면접촉 시험시, 고 Co 합금끼리의 동종 재료 시험시와 거의 동일한 마모특성을 나타낸다. 따라서 접촉압력 15ksi 이하에서 작동되는 대부분의 밸브 경면을 Co-free 합금으로 교체해도 무방함을 알 수 있다.

물 분위기의 높은 접촉하중(15 ksi 이상)을 갖는 조건에서 EB5183, Everit 50, NOREM 01과 04, Tristelle 1과 2 등의 Co-free 및 저 Co 경면합금들의 마모 특성이 고 Co 합금과 거의 동일하다. 따라서 이러한 저 Co 및 Co-free 합금의 기타 물성에 대한 인증이 이루어지면 고 Co 합금을 이들로 교체 적용하는 것이 충분히 가능하다. 그러나 현재 NOREM, EB5183, NITRONIC 60, Tristelle 1, 2 등 고응력하에서 galling과 응착마모 특성이 우수한 것으로 확인된 합금들은 모의 또는 실제 발전소 적용을 통한 인증이 이루어지지 않은 상태로 현재 인증시험의 대상재료로 선정되어 있는 상황이다. 반면에 Deloro 40과 50은 AECL 루프시험에서 그 성능이 만족스럽게 나타나 현재 캐나다의 발전소에서 실제 사용되고 있다.

3.3.1.2. 침식마모 저항성

침식마모는 유체 또는 유체내의 고체입자들이 재료표면에 충돌되어 일어난다.

고속도의 단상 유체 흐름(high velocity single phase flow) 조건에 노출되는 밸브의 경우, 종종 침식-부식이 문제가 되나 충분한 양의 크롬을 함유하는 합금에서는 대부분 침식부식 손상이 낮은 것으로 알려져 있다. Deloro 40과 50은 water jet 충돌시험에서 Stellite 6에 비해 2.5~3배 정도 큰 무게감소량을 나타내는 반면, Everit 50과 Antinit DUR 300은 고속의 고온 1차수 분위기 시험에서 Stellite 6와 거의 동등한 성능을 보였는데 이 합금들이 철계 합금이지만 20% 이상의 크롬을 함유하고 있어 침식-부식에 대한 저항성이 큰 것으로

알려져 있다.

2상(two phase) 침식-부식, 즉 물방울 충돌 및 캐비테이션(cavitation)이 동반되는 침식-부식은 단상의 침식-부식 경우보다 훨씬 더 해로우며 밸브에서 이런 현상이 예상되는 경우는 반드시 인증시험을 거쳐 만족스런 성능을 보이는지 확인하여야 한다. 캐비테이션 침식 실험결과 Tristelle 2는 Stellite 6와 거의 비슷한 성능을 보이나 Tristelle 1과 EB5183은 Stellite 6에 비해 2~3배 정도 침식이 더 일어나는 것으로 알려져 있다. 상온의 탈염수 분위기에서 실험한 캐비테이션 침식-부식 결과에 따르면 NOREM 01과 04는 침식-부식 저항성이 Stellite 21과 같거나 더 좋은 것으로 나타났으며 (308 스테인레스 강에 비해서는 5배 정도 저항성이 큼), 상온 탈염수에서의 캐비테이션 실험에서 NITRONIC 60의 저항성이 Stellite 6B의 2/3 밖에 안되는 결과를 보이지만 300 계열 오스테나이트계 스테인레스 강보다는 3~4배 저항성이 큰 것으로 나타난다.

3.3.2. 마찰계수 [10, 14-18]

두 마찰재료 표면의 마찰계수는 밸브, 특히 게이트 밸브의 설계와 작동에 있어서 매우 중요하다. 실제 밸브가 동시 시트간의 열팽창으로 인하여 게이트가 심하게 고정되기 때문에 이런 경우 밸브를 여는데 필요한 힘은 마찰계수의 영향을 크게 받게 된다. 따라서 이와 같이 마찰계수가 중요한 밸브, 즉 고하중을 받는 게이트 밸브 등에서는 경면합금을 교체할 때 마찰계수를 측정하여 만족스러운 값을 갖는가를 인증하여야만 한다. 마찰계수가 보다 큰 합금으로 교체되면 밸브 작동장치를 바꿔야 하는데 그 이유는 밸브 작동장치가 어떤 특정한 고 Co 경면합금을 기준으로 치수·용량 등이 설계·제작된 것이기 때문이다. 마찰계수는 마찰되는 두 재료가 동종인가, 또는 이중 재료인가에 따라 크게 변하며, 동종 재료간의 마찰계수가 크다고 해서 이중 재료간의 마찰계수가 반드시 큰 것은 아니다. 고 Co 합금은 동종 재료간의 접촉시 마찰계수가 저 Co 합금에 비해 다소 낮다. 그러나 일부 고 Co 및 저 Co 합금을 조합해 보면 고 Co 합금끼리의 마찰계수와 비슷한 값이 얻어지기도 한다. Deloro 합금끼리의 마찰계수는 건조 및 습식분위기에서 모두 Stellite의 마찰계수와 거의 비슷하다. 저온에서는 철계 합금끼리의 마찰계수가 Stellite 6와 거의 비슷하나 고온에서는 Stellite 6의 마찰계수가 철계 합금에 비해 훨씬 작다고 보고되고 있다. 그러나 철계 합금을 347

스테인레스 강과 접촉시켰을 때의 마찰계수는 Stellite 6 끼리의 마찰계수 값까지 떨어진다. NITRONIC 60의 경우는 동종 재료 접촉의 마찰계수가 저하중에서는 Stellite 6 끼리의 마찰계수보다 크나 고하중하에서는

오히려 작아지는 것으로 알려져 있다.

3.3.3. 기계적 성질[2]

현재까지 개발된 여러 경면합금들의 주요 기계적 특

표 6. 각종 경면합금의 기계적, 물리적 특성

Alloy	Hardness Room Temp., HRC	Tensile Strength, ksi	Charpy Impact Strength, ft-lb	Coeff. of Thermal Expansion (70-1100°F) , $\times 10^6$
High Cobalt Alloys				
Stellite 6	39-43	—	17	8.1
Co-156	46-50	—	—	—
Co-12	45	—	—	—
Coast Metal 6	43-47	—	—	—
Low Cobalt Alloys				
Haynes 711	43-47	—	—	—
Haynes N-6	30-32	—	—	—
RHDIIG	38-40	—	—	—
Tristelle 1	—	—	13.8	—
Tristelle 2	—	—	4.0	—
Nickel Based Co-free Hardfacing Alloys				
Colmonoy 4	35-40	—	—	—
Colmonoy 5	45-50	60	3	8.2
Colmonoy 74	38-40	—	—	—
Colmonoy 84	38-44	—	—	—
Deloro 40	29-41	—	2.8	7.7
Deloro 50	46-49	—	2	7.2
Cobex 547	41-42	—	—	—
Tribaloy T700	42-45	—	—	—
Vertex 4776	47-48	—	—	—
Iron Based Co-free Hardfacing Alloys				
Antinit DUR 300	28-32	115	—	9.2
Cenium Z20	42-48	61	—	7.8
Cenium 3	38-41	—	—	—
EB5183	40.5	—	5.5	8
Everit 50	47-53	—	—	9.6
NITRONIC 60	25	123	54	10.1
NOREM 01	45	80	4.2	9.1
RHDIC	41-46	—	—	—
SKWAM	36-42	—	—	—

성 일부를 표 6에 나타내었다. 표에서 볼 수 있는 바와 같이 개발합금 대부분에 있어서 경도값을 제외한 나머지 물리적, 기계적 특성 데이터가 많이 부족함을 알 수 있다. 따라서 각 합금의 특성 비교·평가를 위한 폭넓은 연구가 요구되며, 무엇보다도 재질대체의 기준을 마련함에 있어서 이들 합금에 대한 특성평가가 선행되어야 함이 강조된다. 본 내용에서는 경도와 용접성에 대해서만 간단히 기술하기로 한다.

3.3.3.1. 경도

경도는 경면합금의 마모와 galling 저항성에 매우 큰 영향을 준다. 일반적으로 경도가 증가하면 마모 및 galling 저항성이 커진다고 알려져 있는데 일부 밸브 제조사에서는 서로 접촉하는 면의 경도가 최소한 Rockwell C scale로 35 이상의 값이어야 한다고 추천하고 있다. 그러나 경도가 증가함에 따라서 충격강도와 용접성은 떨어지게 된다. 따라서 마모 및 galling 성능을 충족시킬 수 있는 어느 정도의 경도와 충격강도 및 용접성 등이 잘 조화되어야만 한다.

3.3.3.2. 용접성

용접성은 실제적인 방법상에서 결함없는 용접 표면층(deposit)을 형성시킬 수 있는 용이성을 말한다. 보다 큰 의미에서 한 합금의 용접성은 사용되는 용접절차가 얼마만큼 최적화되었는가에 따라 달라진다. 즉, 어떤 한 합금의 용접성이 나쁘다 할지라도 일단 용접 방법상의 변수가 최적화된다면 쉽게 용접될 수 있다. 또한 용접성은 기판(substrate)재료의 형태와 두께에도 크게 의존한다. 즉, 어떤 한 박판재료에 용접이 잘되던 합금이 다른 재료로 된 후판에는 용접이 안 될 수도 있다.

또 밸브 제조공장에서 자동공정으로 용접된 밸브의 경우 원전 현장에서는 용접이 불가능해 밸브 시트의 수리가 불가능해 질 수도 있다. 따라서 교체용 합금을 선정하는데 있어서 중요하게 고려되어야 할 것은 원전 현장에서 수리를 용이하게 수행할 수 있는 가이다. 작은 밸브들은 수리보다는 교체가 용이하기 때문에 용접성을 고려할 필요가 없다. 그러나 현장에서의 경면부분의 수리가 요구되는 대형 밸브에서는 경면합금 재료를 교체하기 전에 반드시 현장 용접절차가 입증되어야 한다. 이 경우 용접절차의 인준은 실제 현장에 적용할 때와 동일한 조건(기판의 형상 등)에서 수행하는 것이 중요하다.

4. 해외 원전의 코발트 합금 대체기술 적용경험

원전 선진국 각국은 Co reduction program에 맞추어 기존의 Co-base Stellite 합금의 주요특성에 상응하는 우수한 성능의 저 Co/Co-free 합금들을 개발하여 이의 성능평가를 수행 중에 있거나 또는 일부 발전소에 적용하기 시작하였다.

4.1. 미국

4.1.1. 밸브재질 대체

1980년대 초 Vermont Yankee 발전소(BWR)의 급수 조절밸브(feedwater control valve)의 마모특성을 조사한 결과, 이 밸브가 연간 약 40g의 코발트를 방출하는 주요 생성원인 것으로 밝혀졌다. 따라서 이 밸브의 코발트 경면처리 부분을 Rockwell 경도 약 50의 440C 스테인레스 강으로 교체한 결과, 원래 Stellite보다 마모저항성이 좋은 결과를 나타냄으로서, 유량을 조절하는데 사용되었다. 한편 마모가 금속과 금속의 접촉에 기인되는 것이 아니라 캐비테이션 침식 또는 고속의 단상 유체흐름 조건에서의 침식에 의한다는 것이 밝혀졌으며, 이중 캐비테이션 침식에 의한 마모가 가장 있을 수 있는 원인으로 여겨지고 있다. 이후, 440C 스테인레스 강은 여러 발전소에 채택되어 성공적으로 사용되고 있으며 410 스테인레스 강 역시 같은 목적으로 많이 사용되고 있다.

한편 웨스팅하우스 PWR의 유량 조절밸브의 경우 역시 연간 약 1.6g의 코발트를 방출하는 주요 생성원으로 판명되었으며, 주로 단상 유체흐름 침식에 의한 마모에 기인되는 것으로 여겨지고 있다. 이후의 조사로부터, 미국내 발전소의 2/3 가량이 유체흐름 조절에 쓰이는 밸브재료로서 스테인레스 강(440C, 316, 17-4 PH 강)을 사용하고 나머지 1/3이 Stellite를 사용하는 것으로 밝혀졌으며, 스테인레스 강을 사용하는 밸브의 성능이 Stellite 밸브와 같이 우수한 성능을 가짐을 알 수 있었다.

4.1.2. 재료 성능시험

그림 2의 PWR에 대한 EPRI의 통계에서 볼 수 있는 바와 같이, 80년대 초반 노심의 spacer grid를 인코넬 합금에서 Zircaloy-4로 교체하기 시작한 이래 밸브재료

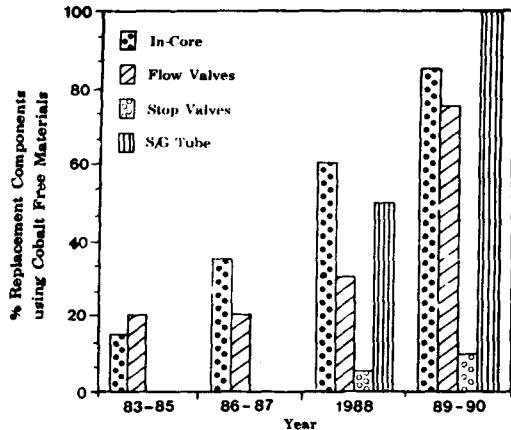


그림 2. PWR 원전의 코발트 재질 대체 현황

를 제외한 노심 및 증기발생기의 대부분이 코발트 생성 원을 줄일 수 있는 개량형 재료로 교체되었음을 알 수 있다. 따라서 현재 EPRI가 주관하는 코발트 감소 계획은 1차계통내 밸브 경면에 사용되는 Co-base 합금을 Co-free 합금으로 대체하는 것을 목표로 하고 있으며, 특히 가동중인 발전소에 대한 기술적용에 초점을 맞추고 있다. 이의 일환으로서, 새로운 재료의 성능평가를 위해 PWR의 수화화 조건을 갖춘 AECL loop에서 4종의 철계 신소재 후보합금과 기존의 Stellite 6 합금을 대상으로 장기간의 밸브 내구성 시험을 수행하여 왔다 [19]. 그 결과, 4종의 후보합금 모두가 육안검사, 누수검사, profilometry 검사결과에 있어서 Stellite 6 보다 우수함이 입증되었으며, 특히 NOREM 04와 EB5183 합금재료는 고온 누수저항성에 있어서 매우 우수한 성능을 갖는 것으로 나타났다. 그밖에 과거 수년간 밸브 공급업체와의 검토를 기초로 하여, Deloro 50, Colmonoy 4, 5, 6, AISI 616, Hastalloy CA, Super WH 및 NITRONIC 60 등과 같은 Co-free 합금을 경면재료로서 사용한 소량의 밸브들이 미국의 발전소에 공급되어 왔다.

4.2. 캐나다

AECL에서는 Co-free 경면합금의 성능평가를 위한 loop 시험 규격화 프로그램을 수행하여 왔다. 이 시험으로부터 코발트 합금의 사용이 요구되지 않는 부품에 있어서 Deloro 40, 50과 Colmonoy 4, 5, 6 합금의 사용이

가능함을 알았다. 따라서 이들 합금은 캐나다내 다수의 신규 발전소에 적용되었으며 현재 좋은 성능을 보이고 있다. Ontario Hydro's Pickering B 발전소의 4~8호기에서의 Stellite 대신 Co-free 합금을 사용한 예는 표 7과 같다. 이들 합금의 적용경험은 1983년 부터 시작되었으며, 그동안 이들 밸브 시트의 유지에 문제가 없었던 점으로 미루어 보아 Ontario Hydro 측은 Deloro 40, 50 합금이 경면재료 성능을 유지할 수 있는 것으로 믿고 있다. 한편 Ontario Hydro 측은 만일에 밸브에 2인치 크기 정도의 결함이 발생될 경우 밸브를 보수하기 보다는 교체하는 표준절차를 마련하고 있다.

4.3. 독일

독일의 KWU는 EPRI와 협력하여 유럽에서 개발된 철계 Co-free 합금인 Everit 50(독일), Antinit DUR 300(오스트리아), Cenium Z20(프랑스) 등에 대한 노의 성능시험을 수행하여 왔다. 이러한 실험결과에 힘입어 Co-free 합금을 경면합금의 많은 부분에 적용하기 시작하였다. KWU 측은 Konvoi series PWR의 1차측 153개 모든 밸브를 Co-free 합금으로 대체사용하고 있음을 밝히고 있다. 현재까지 사용되고 있는 합금, 적용 경면기간 등에 대해서는 밝혀지지 않고 있으나, Everit 50에 대한 부식, 마모, 용접성에 대한 성능평가가 수행되어 왔다. 또한 KWU는 Everit 50 합금이 모든 면에서 Stellite 6와 동등하다고 여기지는 않지만 장래에 많은 발전소에서 이 합금을 사용하는 계획을 세우고 있다.

표 7. Ontario Hydro's Pickering B 발전소의 Co-free 합금 적용에

Valves	Material
Main primary heat transport system(PHTS) in-line gate and check valves	Deloro 40, 50
Moderator and auxiliary D ₂ O system gate, check and globe valve	Deloro 40, 50
Vent and drain globe valve (<2")	Colmonoy 4, 5
D ₂ O system control valve	17-4 PH, AISI 440C SS

한편 Grondhe NPP(1,300 MWe, PWR)의 압력용기 내의 코발트 함유재질 구조물을 Co-free 재질로 대체하여 큰 효과를 거둔 것으로 보고되고 있으며, 고 pH 운전기술, 미세여과재 적용 등의 복합적인 운전조건 개선으로 평균 피폭선량치가 29 man-rem/plant에 불과한 경이적인 기록을 세운 것으로 보고되고 있다.

4.4. 기타 국가

핀란드의 Loviisa 발전소에서는 1차측의 모든 밸브와 2차측 일부 밸브를 Co-free 재질로 교체하였다. 여기에 사용된 합금은 Bohler Fox사에서 공급된 SKWAM이다. 현재까지 이들 합금을 사용한 밸브는 좋은 성능을 보이고 있으며 아무런 문제없이 유지되고 있는 것으로 보고되고 있다.

스웨덴 Ringhals 1호기의 경우, 중기차단 밸브시트의 재료를 인코넬 600과 625 합금으로 교체사용하고 있다. 이 밸브들은 1초만에 폐쇄되는 매우 빠른 동작을 하므로 밸브 시트가 매우 심한 충격하중을 받게 된다. Stellite를 사용했을 경우 균열과 누수가 발생된 경험을 갖고 있다. 따라서 밸브 1개를 Stellite에서 인코넬 600으로, 그리고 밸브 2개에 대해서는 인코넬 625 합금으로 교체하였는데 교체밸브의 성능이 우수한 것으로 나타나고 있으며 교체후 3~4년 동안 누수와 균열의 발생이 없었다. ASEA-ATOM은 Deloro 50을 포함한 Co-free 합금들이 BWR에서 비교적 많이 사용되고 있다고 밝히고 있다.

5. 결 론

이상에서 살펴본 바와 같이, 원전 1차계통내 코발트 합금재질 대체기술은 코발트 핵종 생성원을 근원적으로 억제하여 계통내 방사선량 감소를 꾀한다는 점에서 기존의 관련 기술들과 근본적으로 다름을 알 수 있다. 해외의 경우 이러한 기술개발 수준이 이미 안정화 단계에 이른 점과 현재 국내의 건설예정 발전소에 있어서도 Co-free 합금을 사용하는 새로운 밸브재료의 적용에 대한 기술적 검토가 요구되고 있는 점을 미루어 볼 때, 향후 국내 원전에 대한 이 기술의 적용이 불가피할 것으로 보여진다. 특히 국내 원전 중장기 계획에 따라 추진되고 있는 신형로 및 차세대형 원자로의 경우 허용 피폭선량 상한치가 기존의 경수로보다 훨씬 낮게 설정될 것임에

따라, 이에 대한 적극적인 대응방법으로서 이 기술의 적용에 대한 검토가 요청되고 있는 점을 감안할때, 국내에서도 기존 Co 합금 및 저 Co/Co-free 합금재질의 특성평가, 1차계통 밸브의 설계요건 및 안전성 검토, 방사선량 저감에 미치는 소재영향 평가 등과 같은 요소기술 개발 분야를 체계적으로 진행시켜 국내 원전의 코발트 합금재질 대체기술 적용을 위한 종합적인 대책을 마련해야 한다고 본다.

참고문헌

1. C.J. Wood, "Maintenance of Recent Techniques for LWR Radiation-Field Control," EPRI-4505-SR, March, (1986)
2. H. Ocken, "Cobalt Reduction Guidelines," EPRI NP-6737, Mar., (1990)
3. 송명재 외, "원전 1차계통 방사선량 감소기술 개발", 한국전력공사기술연구원, KRC-90N-J04, (1993)
4. H. Ocken, "Reducing the Cobalt Inventory in Light Water Reactors," *Nuclear Technology*, **6**, 8, Jan., (1985)
5. D.B. Heard and R.J. Freeman, "Cobalt Contamination Resulting from Valve Maintenance," EPRI NP-3220, Aug., (1983)
6. C.A. Bergmann et al., "Evaluation of Cobalt Sources in Westinghouse Designed Three-or Four-Loop Plants," EPRI NP-2681, Oct., (1982)
7. T.R. Young et al., "Cobalt Source Identification Program," EPRI NP-2685, Oct., (1982)
8. C.A. Bergmann and E.I. Landermann, "Cobalt Release from PWR Valve," EPRI NP-3455, July, (1984)
9. L. Nolin, "Cobalt Replacement in Primary Valves," Virginia Power Report, NP-1284, Aug., (1988)
10. H. Haynes, American Patent Paper NO. 873 245.
11. E.W. Ohriner and E.P. Whelan, "Development of Cobalt-free Hardfacing Alloys for Nu-

- clear Applications : 1984 Progress," EPRI NP-4237, Sep., (1985)
12. AMAX, "Production Weld Deposition, and Evaluation of Wear-Resistant Iron-based Hardfacing Alloys," EPRI Report, to be published.
 13. W.J. Schumacher, "A Stainless Steel Alternative to Cobalt Wear Alloys," *Chem. Engr.*, Sep. 21, (1981)
 14. E.I. Landerman et al., "Evaluation of Low-Cobalt Alloys for Hardfacing Applications in Nuclear Components," EPRI NP-3446, Aug., (1984)
 15. P.J. Hofmann and L.C. Friedrich, "Laboratory Evaluation of Iron-Based Hardfacing Alloys," EPRI NP-5874, June, (1988)
 16. Velan Inc., "Laboratory Evaluation of Cobalt-free, Nickel-based Hardfacing Alloys for Nuclear Application," EPRI NP-4993, Mar., (1987)
 17. P.A. March, "A Preliminary Assessment of the Cavitation Erosion Resistance for EPRI/AMAX's NOREM Alloys," Norris, Tenn. : TVA Engineering Laboratory, Jan., (1989) TVA Report WR 28-4-900-233.
 18. "NITRONIC 60 Stainless Steel," Baltimore Specialty Steels Corporation, Baltimore, MD. Armco Product Data Bulletin NO. 45, (1988)
 19. E.V. Murphy et al., Proc. 5th Int. Symp. on Environmental Degradation of Materials in Nuclear Power System-Water Reactor, Aug. 25-29, Monterey, California, (1991)