

고리 3,4 호기 ESFAS MSIS 회로 이중화
설비개선안에 대한 안전성 영향분석

Safety Assessment for the Dualization of ESFAS MSIS Circuit
of Kori 3/4 Units

오해철, 정백순

한진전력연구원
대전광역시 유성구 문지동 103-16

이봉규, 서기춘, 김준수

고리원자력본부
부산광역시 기장군 장안읍 고리 216

요 약

본 논문에서는 전자기관 단순고장에 의한 발전소 불시정지를 방지하기 위해 고리 3,4호기에서 추진 중인 반도체식 논리회로계통(SSILS)의 주증기관 격리밸브(MSIV) 수동차단기능을 담당하는 BOP ESFAS 회로의 이중화 설계변경안에 대한 안전성 영향을 PSA 방법론을 적용하여 평가하였다. 이중화 설계 방안은 발전소 안전성에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

Abstract

For Kori 3/4 units, It is trying to dualize BOP/ESFAS card module which genertates MSIV manual isolation signal since the dualization of electric cards can prevent reactor trip caused by simple failures of electric circuit. The probabilistic safety assessment for design change for BOP/ESFAS circuits was performed and showed that design change had no impact for plant safety.

I. 서 론

고리 3,4호기에서는 전자기관 단순고장에 의한 발전소 불시정지를 방지하기 위해 반도체식논리회로계통(SSILS)의 MSIV 수동차단기능을 담당하는 BOP ESFAS FBM 및 ULM 전자기회로기판의 이중화 및 ROM 전자기판의 출력 접점을 직, 병렬 연결하여 운전하는 내(耐)고장회로의 설치를 추진중이다. 발전소 정상 운전시 불시정지방지라는 순기능을 목적으로 설계 변경되는 MSIV 수동차단회로의 이중화 설계안은 이중화된 카드 Module 모두에서 신호를 받아야 만 작동되기 때문에 사고시 발전소 안전을 위해 주증기관 격리가 필요할 경우, MSIV 수동 차단신호생성에 대해서는 불리한 측면으로도 작용할 수도 있다. 이에 따라 이중화 설계안이 주증기관 차단밸브

(MSIV)의 닫힘실패에 미치는 영향 및 전체 노심손상빈도에 어느 정도 영향을 미치는 지 평가할 필요가 있다.

II. MSIV 수동차단회로 설계 변경(안)에 대한 안전성 평가

고려되고 있는 이중화 대상으로는 반도체식 논리회로계통을 경유하는 수동 주증기차단신호 생성회로들의 FBM 카드와 ULM 카드 그리고 릴레이 카드 모듈인 ROM 카드로서 이중화 대상부분은 그림 1에 점선으로 나타냈고, 상세한 설계변경안은 그림 2와 그림 3에 나타냈다.

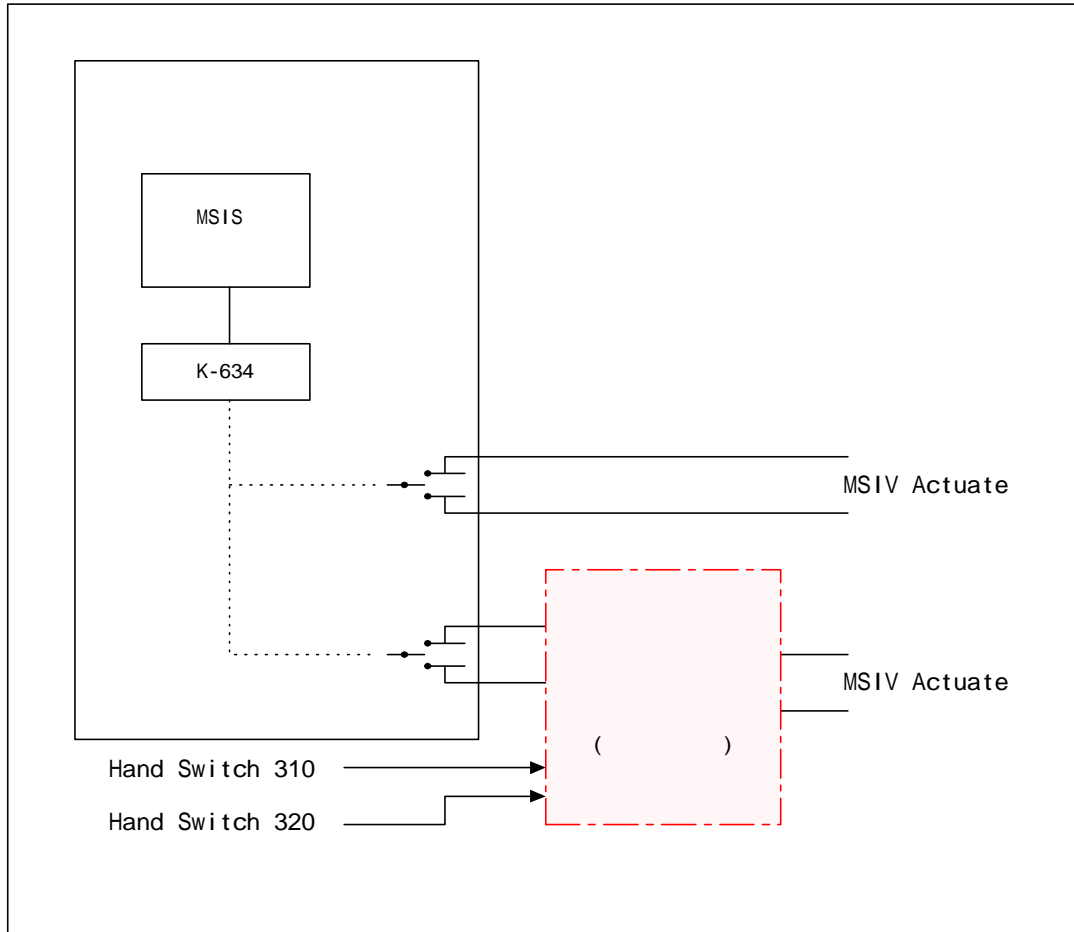


그림 1 이중화 대상

1. 변경 전 및 변경 후의 설계안

가. 설계변경 전

반도체식보호계통(SSPS)에서 발생한 주증기차단신호(MSIS : K634) 및 주증기차단 수동스위치(HS 310,320)에 의해 생성된 신호가 FBM(JP036H SLOT21)을 거쳐 ULM(BOP ESFAS, JP036H SLOT 21)에 입력되어 내부논리회로를 통해 경보를 발생하고 또한 ROM (JP036H SLOT 22)의 릴레이를 동작시켜 주증기차단밸브(MSIV) 닫힘 신호를 발생시킨다. (TRAIN A,B 동일)

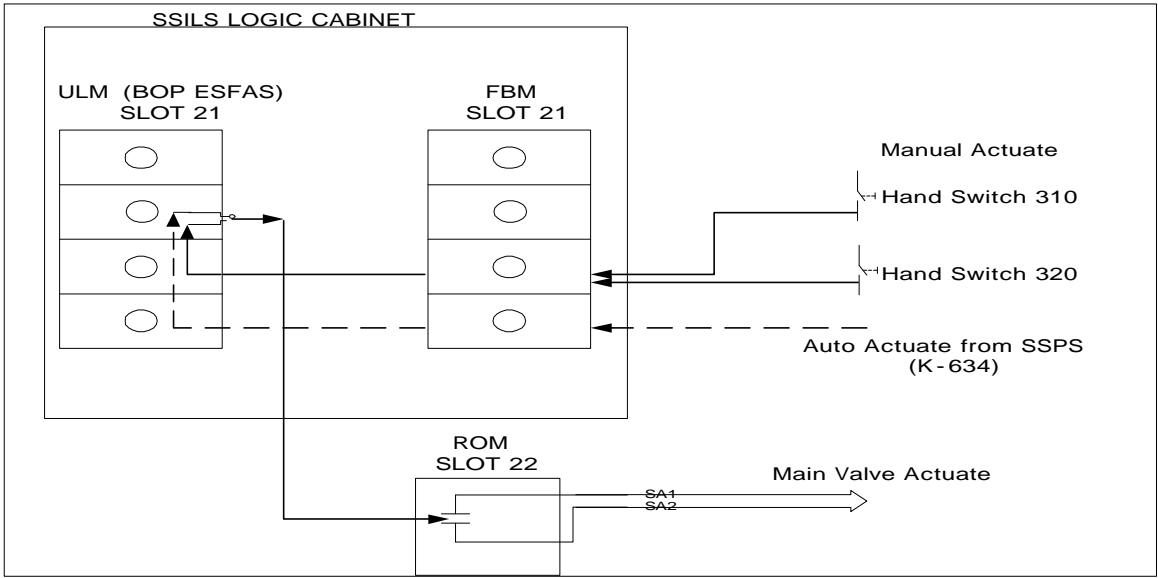


그림 2 설계변경 전 고리 3,4호기 반도체식논리계통(SSILS) MSIV 수동차단회로

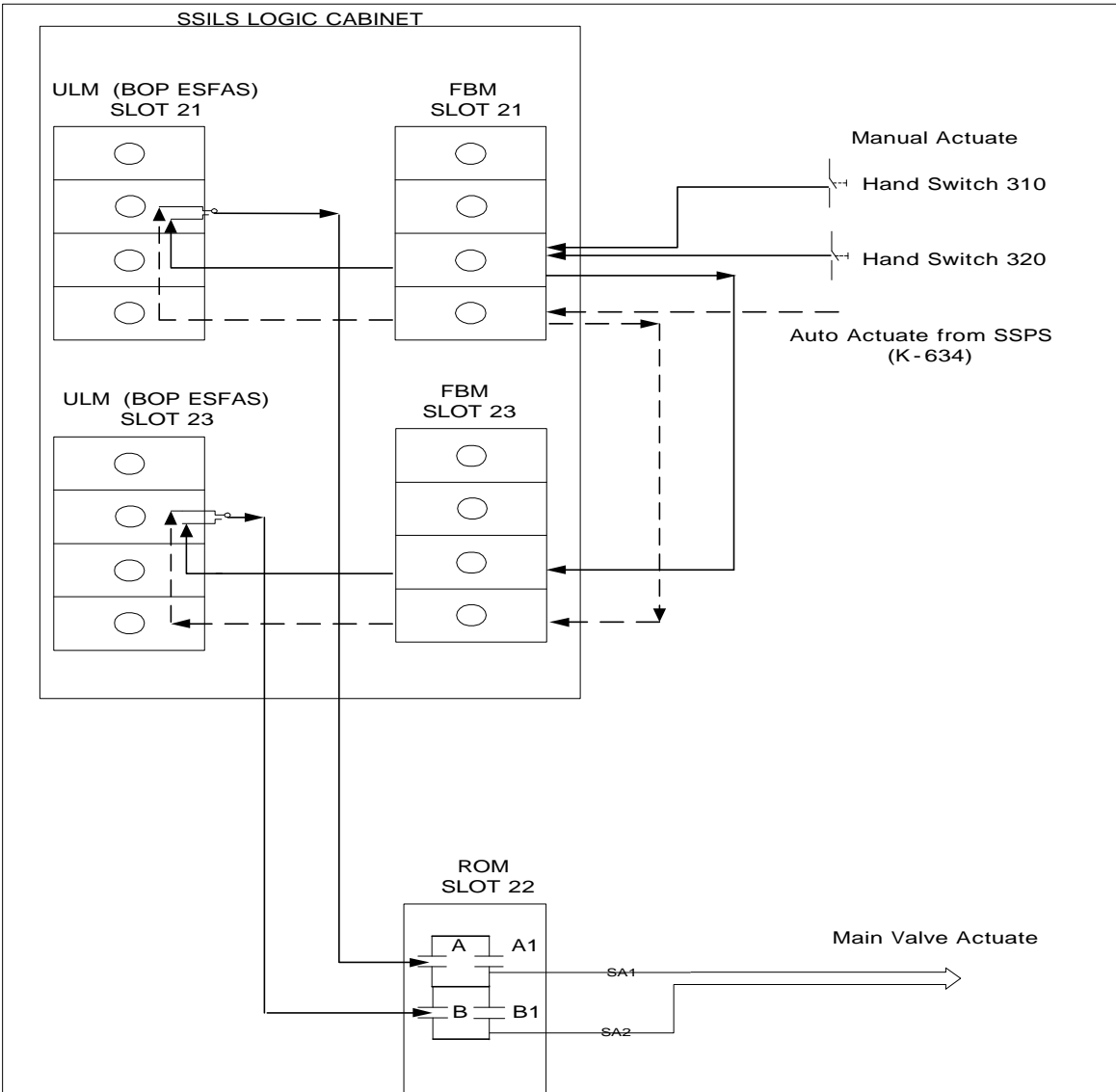


그림 3 설계변경 후 고리 3,4호기 반도체식논리계통(SSILS) MSIV 수동차단회로

나. 설계변경 후

반도체식보호계통(SSPS)에서 발생한 주증기 차단신호(MSIS : K634) 및 주증기차단 수동스위치 (HS 310,320)는 이중화된 FBM (JP036H SLOT 21, 23)을 거쳐 이중화된 ULM (BOP ESFAS, JP036H SLOT 21, 23)에 입력되어 내부 논리회로를 통해 경보를 발생하고 또한 ROM (JP036H SLOT 22)의 두 개의 카드 모듈 모두에서 받는 직, 병렬로 구성된 릴레이를 동작시켜 주증기 차단밸브(MSIV) 닫힘신호를 발생시킨다. (TRAIN A,B 동일)

2. 안전성 평가 내용

안전성 평가는 기존 설계안 및 설계변경 안에 대해 MSIV 격리신호 생성 이용불능도를 계산 하여보았고, 본 회로 설계변경안이 갖는 MSIV 격리 이용불능도 및 노심손상빈도등 네가지 영향을 비교 평가하는 것으로 수행하였다.

- 가. MSIV 수동차단신호생성 실패확률(Failure of manual MSIV isolation signal generation)
- 나. SSILS 및 SSPS에 의한 수동 및 자동 MSIV 차단신호생성 실패확률 (Failure of manual & auto MSIV isolation signal generation)
- 다. MSIV 격리에 이용불능도 (Failure of anyone MSIV's Closure)
- 라. 전체 노심손상빈도 (Total CDF)

위의 네가지 경우에 대한 영향 평가를 위해 기존 고리 3,4 PSA 모델에서 고려하지 않은 SSILS 를 경유하는 MSIV 수동차단신호 실패 고장수목을 작성하여 추가하고, 기존 고리3,4/영광 1,2 RPS/ESFAS 정기점검요건완화연구에서 작성된 고리 3,4 PSA 모델에 연결하여 MSIV 격리 이용 불능도 및 전체 노심손상빈도를 구하였다. 반도체 논리회로를 거치는 수동차단신호실패 사건이 연결된 MSIV 닫힘 실패 고장수목은 그림 5에 나타냈다.

3. 계통 고장수목 구성

SSILS BOP/ESFAS 카드의 고장수목 구성을 위해 다음과 같은 사항이 고려되었다. 그림 1과 2에서 보여지는 것처럼 반도체식보호계통(SSPS)의 K634 릴레이를 거쳐 발생한 주증기 차단신호는 반도체식보호계통 자체 만으로 자동 주증기 격리밸브(MSIV) 차단신호를 생성시키는 것 외에 다중성 개념에 의해 수동차단신호 (Manual Isolation Signal)와 함께 반도체식논리회로 (SSILS)를 거쳐 다시 확인하게 되어있다. 그러나, 반도체식보호계통(SSPS)에서 생성된 자동차단 신호가 반도체식논리계통(SSILS)을 거치는 동안 전달이 실패해도 MSIV 자동차단 활성화 관점에서는 아무런 영향을 주지 않으므로 본 계통고장수목에서는 SSPS 자동차단신호 전달에 의한 SSILS의 차단신호발생은 모델하지 않고, 보수적으로 수동스위치 작동에 의한 반도체논리계통의 수동차단신호 전달 실패만 모델했다. 수동차단신호를 전달하는 SSILS 계통의 고장수목구성은 주요 전자회로기판(CARD) 단위로 구성했으며 새로 변경된 ROM Card의 Relay 부분은 별도로 모델 했다. 주요 구성카드의 기기고장데이터는 고리 3,4호기의 운전기간동안 고장이력을 조사하여 구하였고, 그외의 기타 기기데이터는 일반자료원(WCAP-10271)의 값을 참조하여 사용하였다. 설계 변경후의 계통 MSIV 수동차단회로 고장수목은 그림 4에 나타내었다.

4. 기기 신뢰도 데이터

SSILS BOP ESFAS 회로를 구성하고 있는 주 카드인 FBM 과 ULM card에 대한 기기 신뢰도 계산은 고리 3,4호기의 기기 고장 이력을 조사하여 대수정규분포와 χ^2 함수식을 적용하여 계산하였다.

$$\lambda (0.5) = \chi^2 (0.5, D1) / 2 T \quad : 50\text{th percentile}$$

$$\lambda (0.95) = \chi^2 (0.95, D1) / 2 T \quad : 95\text{th percentile}$$

$$\lambda (\text{mean}) = \lambda (\text{median}) * \exp([\{\ln(EF)/1.645\}^2]/2)$$

$$EF (\text{Error Factor}) = \lambda (0.95) / \lambda (0.5)$$

$$U (\text{component unavailability}) = 1/2 * \lambda (\text{mean}) * t$$

여기서, λ = 기기 고장율 [1/hr]

T = 기기 운전시간

$\chi^2 (0.5, D1)$ = chi-squared function

t = 기기 점검기간 [hr]

D1 = 2r+2 (r은 고장횟수)

기기 운전시간은 고리3호기에 사용되는 카드는 1985년 9월 이후, 고리 4호기의 경우는 1986년 6월 이후, 양호기 공용으로 사용되는 카드의 고장이력은 고리 4호기 운전년수를 기준으로 현재까지 (2000년 12월말)의 고장이력을 조사하였다. 고리 3호기 운전시간은 133,560 hr, 고리 4호기 운전시간은 127,020 hr로 계산되었다. 고리 3,4호기에 대한 반도체논리회로 카드고장이력의 집계표를 표 2에서 표 5까지 나타냈다.

1) FBM card

- 설치수량 : 고리 3호기 993개, 고리 4호기 993개, 양호기 공용 64개

- 고장횟수 : 고리 3호기 23번, 고리 4호기 12번, 양호기 공용카드 1번, 총합계 36번

- 고장율 :

$$\lambda (0.5) = 1.37E-7/\text{hr}$$

$$\lambda (0.95) = 1.78E-7/\text{hr}$$

$$\lambda (\text{mean}) = 1.39E-7/\text{hr}$$

- 기기 unavailability = $\lambda (\text{mean}) * t / 2$, (t 는 18개월 점검주기) = 9.14E-4

2) ULM(BOP ESFAS) card

- 설치수량 : 고리 3호기 16개, 고리 4호기 16개

- 고장횟수 : 고리 3호기 1번, 고리 4호기 0번, 총합계 1번

- 고장율 :

$$\lambda (0.5) = 4.03E-7/\text{hr}$$

$$\lambda (0.95) = 1.14E-6/\text{hr}$$

$$\lambda (\text{mean}) = 4.92E-7/\text{hr}$$

- 기기 unavailability = $\lambda (\text{mean}) * t / 2$, (t 는 18개월 점검주기) = 3.23E-3

3) 기타 기기의 고장데이터

부품명	기기 고장율 (/hr)	기기 이용불능도
relay card ¹⁾	4.78E-7	3.14E-3
relay ²⁾	8.70E-8	5.72E-4
switch ²⁾	1.70E-7	1.12E-3

주 1) 고리 3,4호기 RPS/ESFAS 점검주기연장 연구에서 조사된 고리3,4호기 고유고장데이터[2]

2) WCAP-10271의 일반자료[3]

4) 기기정비 및 시험으로 인한 기기이용불능도

주 카드 (FBM, ULM, ROM)의 점검 및 시험으로 인한 이용불능도는 18개월에 한번씩 8시간의 카드점검 및 교체로 인해 사용 불가능한 것으로 가정하였다.

$$\text{기기시험/정비로 인한 기기이용불능도} = \tau/t = 8 \text{ hr} / 13140 \text{ hr} = 6.09\text{E-4}$$

5) 공통원인 고장인자

핸드스위치 및 Relay의 공통원인고장인자로는 0.1을 가정하였다.

5. 평가 결과

설계변경 전과 설계변경 후의 안전성평가 결과는 표 1과 같이 나타났다.

표 1. 고리 3,4호기 SSILS MSIV 수동차단회로 안전성 평가결과

안전성 평가항목	설계변경 전 A	설계변경 후 B	절대 변화량 (B-A)	안전성 영향 (B-A)/A
• MSIV 수동차단신호 생성 실패확률	9.796E-3	1.464E-2	4.844E-3	49.4 % 증가
• 수동 및 자동 MSIV 차단신호 생성 실패확률	1.302E-6	1.946E-6	6.440E-7	49.5 % 증가
• MSIV 격리 이용불능도	1.538E-2	1.538E-2	증가없음	증가 없음
• 전체 노심손상빈도	8.048E-5/yr	8.048E-5/yr	증가 없음	증가 없음

III. 결 론

전체적으로 수동차단신호생성에 대한 계통이용불능도는 이중화된 카드의 기기신뢰도 만큼 증가했지만, 수동차단신호가 갖는 기여도가 적기 때문에 본 논문에서 안전성 분석 관점인 MSIV 닫힘 실패 관점에서는 MSIV 수동차단회로 이중화로 인한 영향이 없었으며, 또한 노심손상빈도 측면에서도 아무런 영향이 없었다. 따라서 발전소 불시정지방지의 순기능 강화를 목적으로 채택된 이중화 방안은 발전소 안전성에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

참고문헌

[1] 고리 3,4호기 확률론적 안전성 평가 (1단계) 최종보고서, 한국전력공사, 1992.8
 [2] 고리 3,4호기/영광 1,2호기 원자로보호계통 및 공학적안전설비 정기점검 요건 완화연구
 한전전력연구원, 1999.8
 [3] Janens R. L. et al., " Evaluation of Surveillance Frequency and Out-of-Service Times
 for the Reactor Protection Instrumentation System", WCAP-10271, Westinghouse,
 1983.1

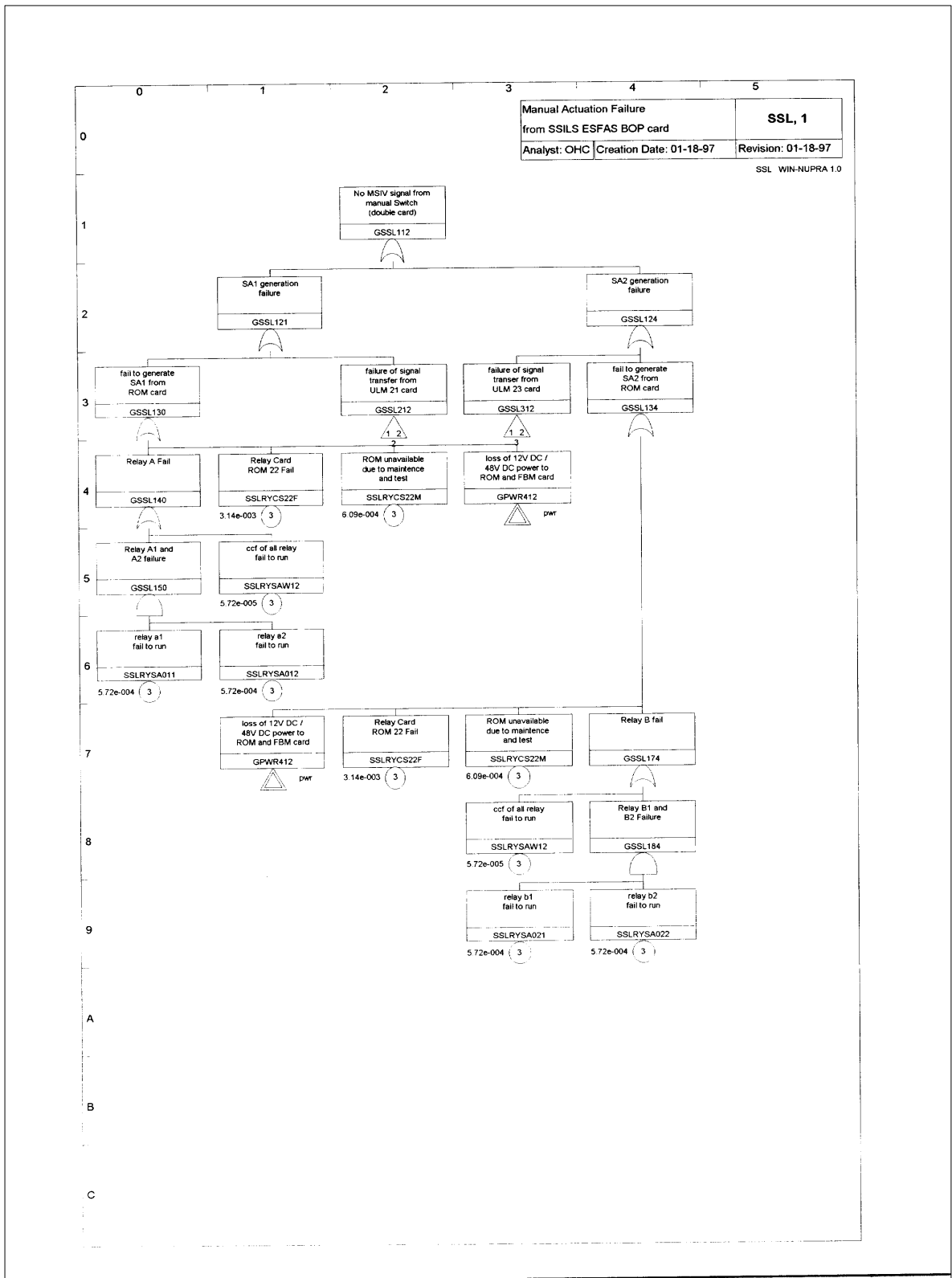


그림 4. 설계변경 후의 MSIV 수동차단회로 관련 계통 고장수목 (1/3)

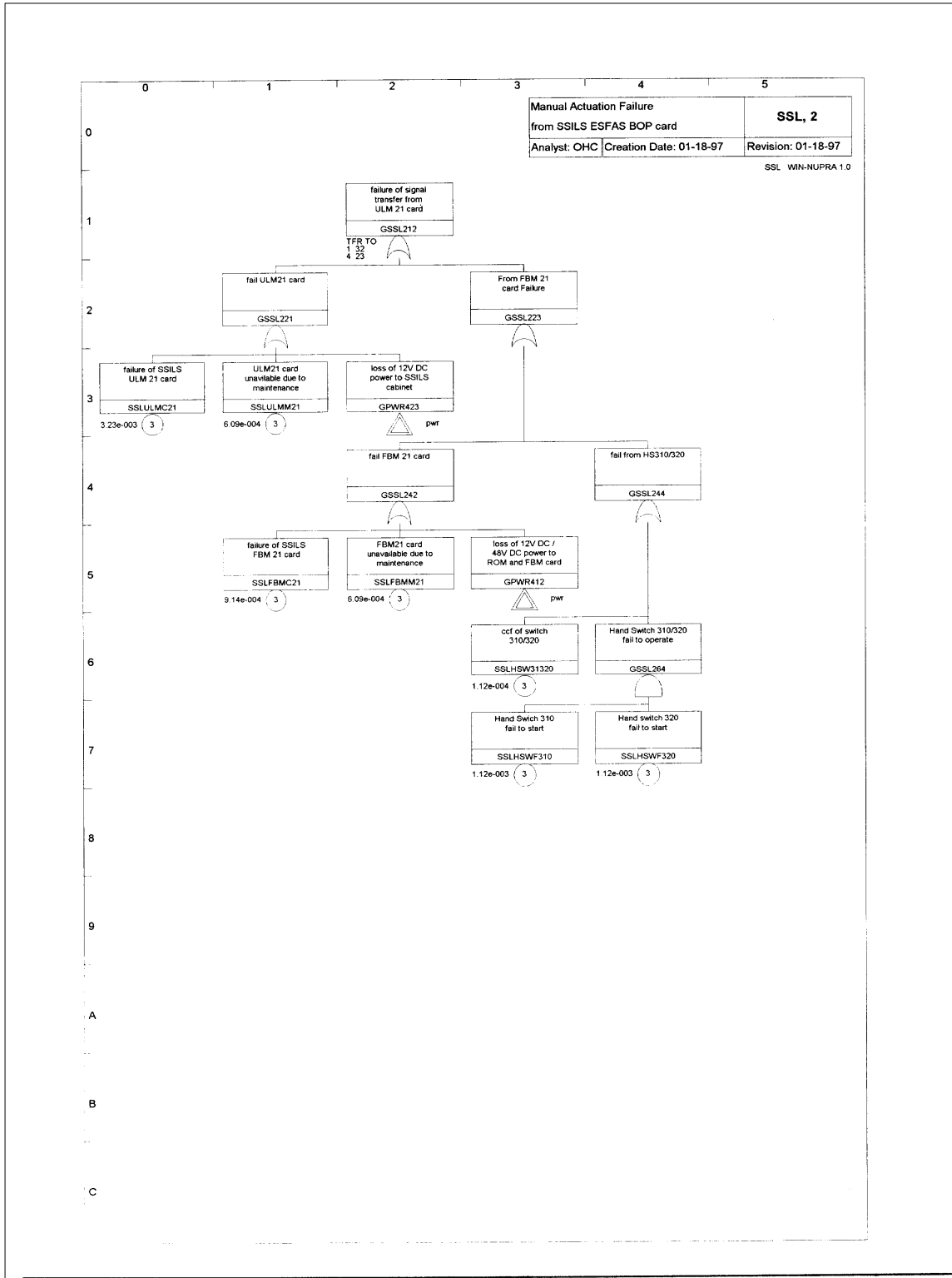


그림 4. 설계변경 후의 MSIV 수동차단회로 관련 계통 고장수목 (2/3)

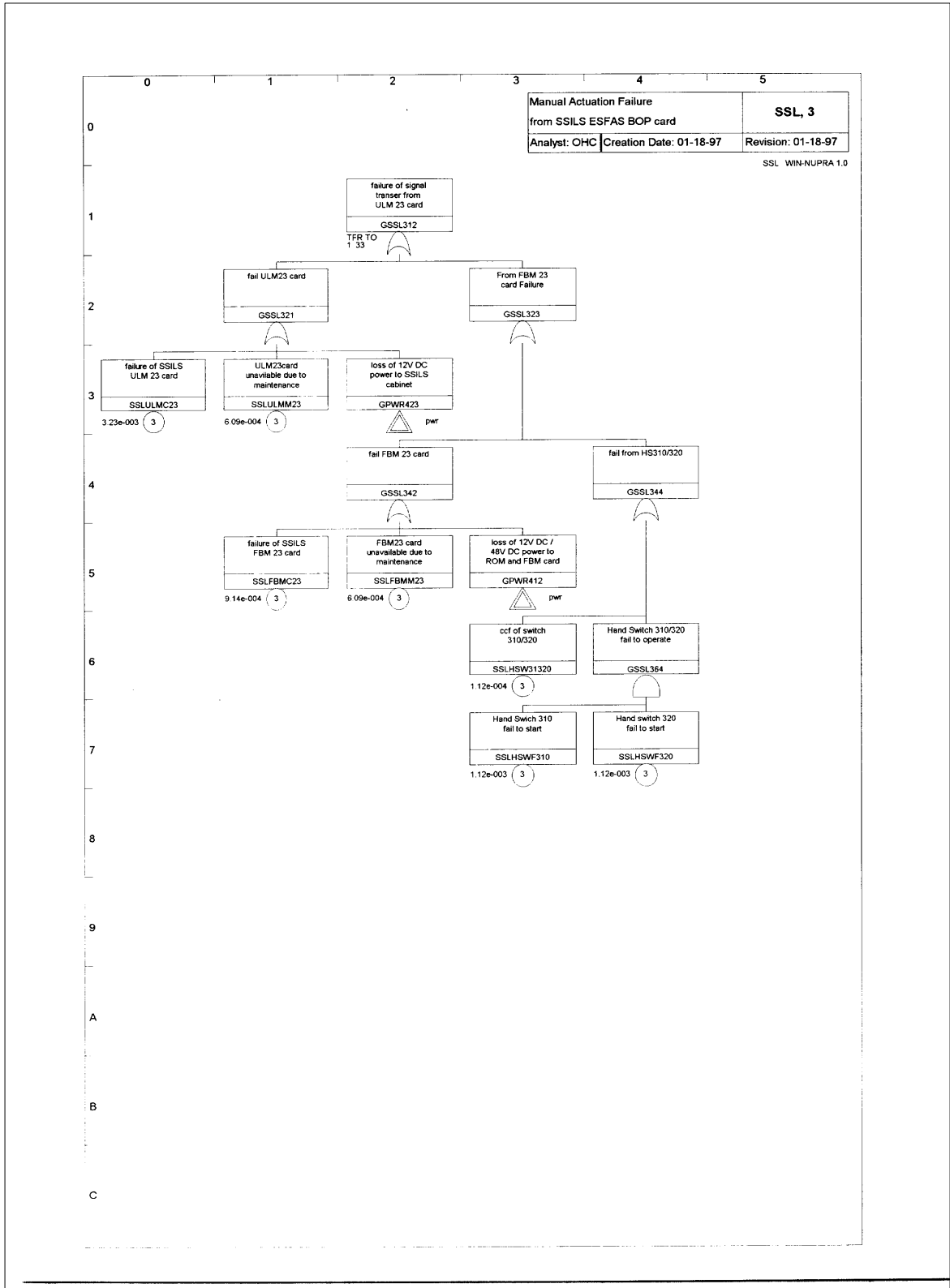


그림 4. 설계변경 후의 MSIV 수동차단회로 관련 계통 고장수목 (3/3)

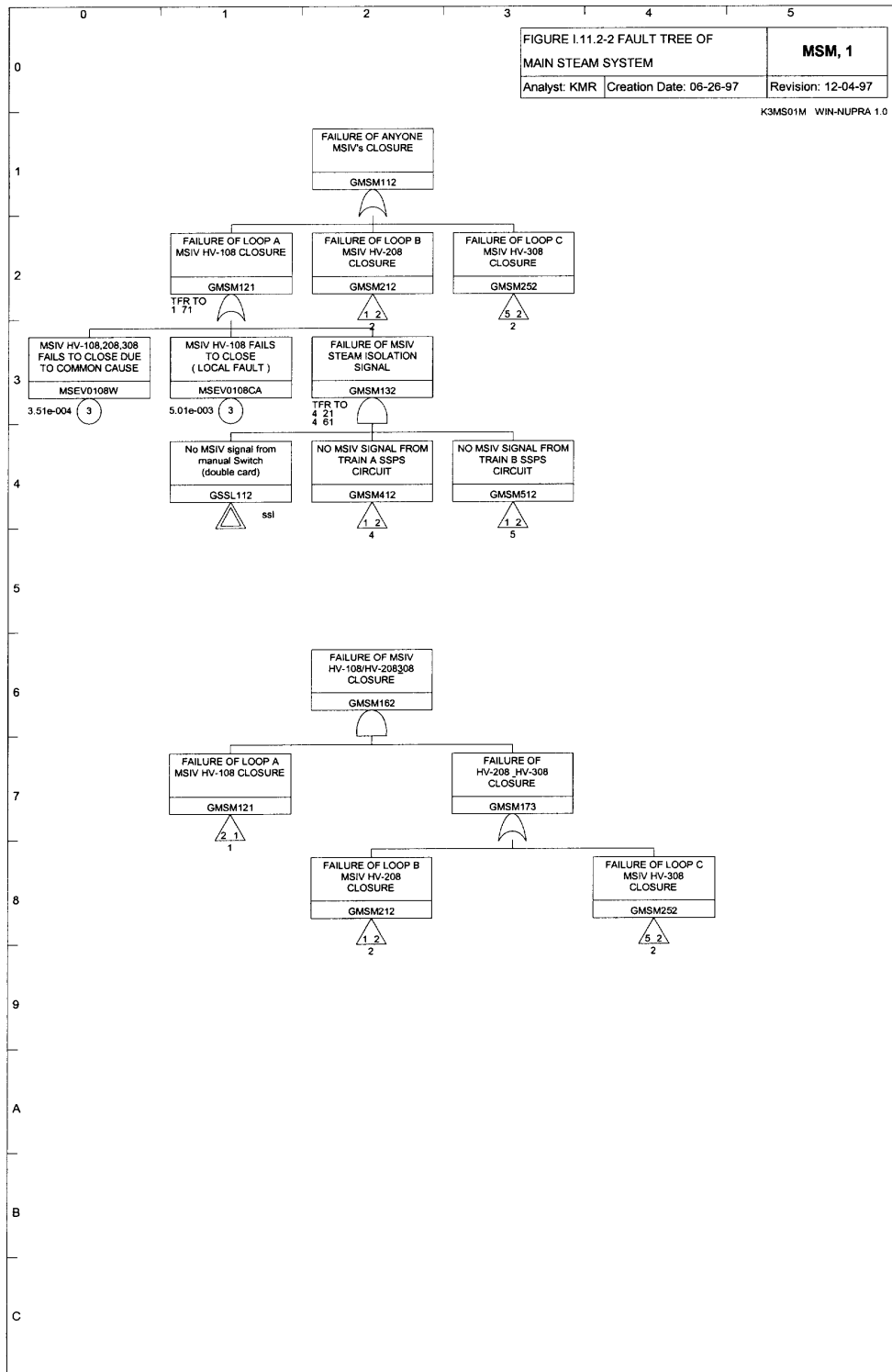


그림 5. MSIV 격리실패 관련 고장수목

표 2. 고리 3,4호기 반도체논리회로 전자기판 고장이력집계

1. 설치수량

기판명	설치수량				불량				비고
	3호기	4호기	공용	합계	3호기	4호기	공용	합계	
BOP-ESFAS	16	16	0	32	1	0	0	1	설계변경에 사용하는 동일기능 기판 모터구동밸브에서 입력되는 현장 신호는 교류고압전원이 유기되어 고장이 발생하는 것으로 분석됨
	642	642	56	1340					
FBM-3	351	351	8	710					
	993	993	64	2050	23	12	1	36	
ROM	186	186	9	381	0	1	0	1	

2. 산출근거 : TR, 정비기록대장(SSILS)

3. 운전기간(준공일 기준)

3호기 : 1985. 9

4호기 : 1986. 6

표 3. 고리 3호기 3분기 반도체반도체로 (SSILS) 전자기관 고장이력 자료

3 호기(1985년 9월 ~ 현재)

날 짜	일련번호 (기번호)	고장내용	카드명	설치위치	고장원인	FBM 사용처	비 고
85/12/24	EB-33	EB SYS TROUBLE 간헐적 경보발생 MU WTR TO TPCW TK N-1056	FBM-3	JP026F/08	CARD 교체	N	
87/1/31	CG-10	COND. VAC. PP(B) START SEAL WATER REC. PP 만 기동되고 MAIN VAC. PP 기동안됨	FBM-3 FBM-1 AOB	JP071C/38 JP071C/34 JP071C/34.8	CARD 교체	N	고장 기관 연행히 알수없음
87/2/2	AF-54	AF-LV-110 FAIL OPEN	FBM-3	JP071G/36	CARD 교체	N	
87/9/19	AB-96	AB-HV-551 전자기관 점검요	FBM-3	JP061J/15	CARD 교체	N	
87/9/26	BB-86	RCP TRIP LOGIC FBM CARD 교체	FBM-3	JP036M/45	CARD 교체	N	
87/9/28	GK-43	GK-HZ-118 FAIL CLOSE	FBM-3	JP036G/19	CARD 교체(FIELD POWER LOSS)	M	
88/1/18	GL-44	GL-F152 운전중 DISABLE 발생하며 청지됨	FBM-3	JP026K/03	FBM FUSE 교체	N	
88/1/28	XP-348	GM-F048 H/S START/STOP LAMP 동시 ON 상	FBM-3	JP036N/08	LOGIC POWER FAIL로 CARD교체	N	
88/12/8	BG-176	BG-HV-046 CLOSE 상태에서 OPEN 안됨	FBM-3	JP026A/40	CARD 교체	M	
89/6/10	AL-18	AL-HS-114C DOUBLE INDICATION XX-HS-61R LOCAL 선택시 CONT RM B SW DISABLED 경보발생 안됨	FBM-3	JP036A/30	CARD 교체	N	
89/7/27	기타-363	DISABLED 경보발생 안됨	FBM-3	JP061F/38	CARD 교체	N	
91/1/30	9101056	BB-HV-206 OPEN 안됨	FBM-3	JP61D/47	CARD 교체	M	
92/2/27	9200979	AD-P011 기동안됨	FBM-3	JP071D/19	CARD 교체	N	
92/3/15	9202413	BB-HV-201 OPEN안됨	FBM-3	JP036D/44	CARD 교체	M	
92/4/13	9203632	MFV "A" AIR COMP AIR 공급 SOV 점검요	FBM-3	JP036A/9	CARD 교체	N	
92/11/21	9209819	AD-LV-017	FBM-3	JP071F/39	CARD 교체	N	
93/4/3	9302533	BG-FV-113F TROUBLE 발생	FBM-3	JP026A/21	CARD 교체	N	
93/4/15	9302923	BG-FV-113F TROUBLE 경보 & MANUAL	FBM-3	JP026A/21	CARD 교체	N	
94/7/12	9404594	SSILS JP061F/09 점검요	FBM-3	JP061F/09	CARD 교체(LED 자체불량)	N	
94/10/6	9405617	AB-HS-309B TROUBLE 지시관련 점검요	FBM-3	JP061J/38	CARD 교체	N	
95/9/11	9506513	BH-HV-003	FBM-3	JP036D-10	CARD 교체	M	

* 사용처는 MOV 는 "M" 으로 MSIS 와 동일하게 쓰이는 것은 "N" 으로 따로 표기함.

표 4 고리 4호기 반도체관리회로 (SSILS) 전자기판 고장이력 자료

4호기(1986년 6월 ~ 현재)

날 짜	일련번호 (TR번호)	고장내용	카드명	설치위치	고장원인	FBM 사용처	비 고
87/4/14	GT-21	GT-HV418 DOUBLE INDICATION 땀	FBM-3	JP061B/12	CARD CM2 LAMP회로불량	M	
87/6/11	AL-31	AL-HS B "DISABLE" 발생시 LAMP NOT ON	FBM-3	JP061A/41	CARD 불량	N	
88/9/8	BH-55	CLOSE시 DOUBLE INDICATION 땀	FBM-3	JP061D/37	CARD 불량	N	
89/6/11	GK-22	GK-HZ-142 DOUBLE INDICATION 땀	FBM-3	JP036G/27	CARD 불량	M	
89/7/25	GK-30	GK-HZ-247 CLOSE 되어 OPEN 안됨	FBM-3	JP061G/20	CARD 불량	M	
91/6/1	9105190	AB-LV-407에 TROUBLE 발생	FBM-3	JP026R/06	CARD 교체	N	
91/8/23	원-275	AB-HV-209 MSIV "B" OPEN 안됨, ACC PR LOW	FBM-3	JP061J/37	CARD 교체 및 RELAY 교체 후 정상	N	
91/9/21	9109185	EG-HV-232, CCW TRN "B" FLOOD ALARM 발생	FBM-3	JP061F/31	CARD 교체	M	
92/3/31	9203086	AF-BTV-238 동작용 SOV 온도낮음	FBM-3	JP071J/18	CARD 불량 상태	N	
93/3/4	9301962	CT-EY-035 CLOSE(LH FRNT CLD RH PIPE DRN	FBM-3	JP071C/42	CARD 교체	N	
93/8/5	9306076	WEST ELEC PENET RM AHU B-F077 경보발생	FBM-3	JP061K/32	CARD 교체	N	
96/8/15	9605412	BG-HV-008 HAND SWITCH 이중지시(WV CLOSE	FBM-3	JP026C/06	CARD 교체	M	
89/1/13	BB-90	RX TRIP시 RCP "A" BACK-UP BRK OPEN 안됨	ROM	JP061L/02	CARD 불량	N	

* 사용처는 MOV는 "M"으로 MSIS와 동일하게 쓰이는 것은 "N"으로 따로 표기함.

표 5 고리 3,4호기 공용 반도체논리회로 전자기관 고장이력 자료

날 짜	일련번호 (TR번호)	고장내용	카드명	설치위치	고장원인	FBM 사용처	비 고
96/1/22	9600649	BB-PV-445B	FBM-3	JP061D/16	CARD 교체	N	
96/3/11	9601902	AB-LV-405	FBM-3	JP026R/05	CARD 교체	N	
90/7/5	9006901	AFAS T/D TRN "A" SIGNAL 오동작 및 관련키기 동작됨	ESFAS	JP036M/18	CARD 교체	N	

* 사용처는 MOV 는 "M" 으로 MSIS 와 동일하게 쓰이는 것은 "N" 으로 따로 표기함.