

〈기술보고〉

고속증식로의 나트륨 화재 특성연구

안도희 · 조 만

한국원자력연구소

배재흠

수원대학교

지문구

한국전력공사

(1992. 12. 31 접수)

요 약

나트륨은 매우 화학적으로 활성이 크므로 고속증식로를 비롯한 나트륨 관련 시설에서 나트륨이 누설되어 공기와 접촉할 때 나트륨 화재가 발생한다. 본 연구에서는 국내 나트륨 화재 시설의 건설 및 운전에 앞서 나트륨을 이용하는데 중요한 나트륨의 핵적, 물리적, 화학적 성질을 살펴 보았고 나트륨 화재의 분류 및 특성, 그리고 고속증식로 개발을 추진하고 있는 각국의 나트륨 화재 연구 현황을 조사하였다.

1. 서 론

기존의 원자로 보다 열효율이 높고 연료인 우라늄의 자원이용 효율을 60배이상 제고시킬 수 있으며 보다 고유 안전성을 갖춘 고속증식로는 자원의 고갈과 환경문제를 해결할 수 있어 21세기의 유망한 에너지원으로 기대되고 있다.

고속증식로는 표 1에서 보는바와 같이 냉각재로 기존 원자로의 물대신에 나트륨을 사용하고 있는데 이는 나트륨이 핵적, 열수력학적 특성이 우수하기 때문이다. 즉, 나트륨은 액체상태(상압에서 98과 883℃ 사이)에서 유체역학적 특성이 물과 비슷하지 만 열전도도가 물보다 약 100배 높고 비등점(상압에서 883℃)이 대단히 높아 원자로 운전온도에서도 나

트륨을 저압상태의 액체로 유지할 수 있어 기존 원자로의 고압에 기인되는 안전성문제가 제기되지 않는다. 또 나트륨은 물보다 양호한 자연대류에 기인한 냉각능력 때문에 이를 냉각재로 사용할 경우 보다 높은 고유 안전성의 원자로를 기대할 수 있다.

표 1. 전형적인 발전용 원자로 및 냉각재 [1]

원자로형	냉각재	출력밀도	냉각재온도 (℃)	계통압력 (atm)
가압경수로(PWR)	H <sub>2</sub> O	70	315	150
비등경수로(BWR)	H <sub>2</sub> O	50	285	70
CANDU	D <sub>2</sub> O	10	295	100
고속증식로(FBR)	Na	500	500	1

그러나, 나트륨은 원자로의 냉각재로서 이러한 장점이 있지만 다른 여러 원소와의 반응성이 높아 취급에 주의를 요한다. 나트륨 장치에서 고온의 용융나트륨이 공기중에 노출되면 산소와 격렬하게 반응하여 높은 열과 알칼리성 화재생성물들(NaOH, Na<sub>2</sub>O, Na<sub>2</sub>O<sub>2</sub>등)을 발생시켜 단순한 화재 차원을 넘어 사용자재의 손상, 온도와 압력의 증가로 인한 격납용기의 파손등 심각한 위험을 초래할 수 있다. 그러므로 고속증식로의 설계는 나트륨의 이러한 특성을 고려하여 나트륨누설을 최대한 방지하고 혹 나트륨의 누설시에도 나트륨 화재를 수용하고 진화시킬 수 있는 특별한 구조를 갖추고 나트륨 화재 연구를 통하여 나트륨 화재 예방 대책을 강구할 수 있어야 한다.

나트륨 화재특성 연구는 고속증식로 개발을 주도해온 미국, 영국, 프랑스, 독일, 일본등의 선진국가에서 일찍부터 화재시험 시설을 건설하여 수행되어 왔다. 이는 고속증식로 운전시 나트륨 유출에 의해 발생가능한 나트륨 화재를 예방하거나 혹 화재가 발생하여도 이의 영향을 최소화하며 가상의 나트륨 화재시 그 결과를 예측하고 원자로 용기, 주요기기 및 부품의 안전성을 충분히 고려하여 설계함으로써 원전의 건설인허가를 받을 수 있게 하기 위한 것이다.

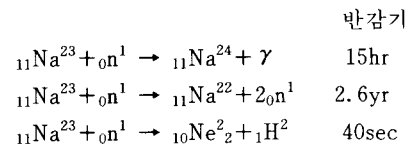
국내에서는 2000년대 초 원형로 설계 및 건설을 목표로 고속증식로 추진계획을 갖고 있고 지금까지 고속로 핵계산, 열수력등의 기초연구들이 수행되어 왔다. 그러나, 고속증식로 안전성의 기초기술이 되는 나트륨 화재 특성에 대한 연구는 국내에서 지금까지 수행되지 않았다. 따라서 본 연구에서는 2000년대 고속증식로 기술자립 목표의 일환으로 앞으로 건설 예정인 나트륨 loop, 원형로등 나트륨 관련시설의 안전대책확보를 목표로 1차적으로 지금까지 발표된 나트륨 화재 특성과 세계 각국의 나트륨 화재연구 현황을 조사하였다.

## 2. 나트륨의 성질

### 1) 나트륨의 핵적 성질 [2, 3]

나트륨이 누설되는 경우 나트륨이 주위의 공기,

콘크리트등과의 반응으로 화재를 일으키기도 하지만 일차계통에서의 누출은 화재는 물론 방사능물질을 배출시키는 위험을 초래할 수 있다. 이들 방사능물질들은 냉각재인 나트륨이 방사화되거나 냉각재 계통의 구조재료인 Fe, Cr, Mn, Ni등이 부식 용출되어 방사화된 것들과 핵분열 생성물인 Cs, I 등이다. 나트륨은 가압경수로의 냉각재인 물보다 중성자 흡수 단면적이 작지만 원자로 내부에서 천연나트륨인 Na<sup>23</sup>이 일부 방사화되어 방사성 나트륨인 Na<sup>22</sup>, Na<sup>24</sup>를 생성시킨다. 이의 핵반응을 요약하면 다음과 같다.



가동중인 일차 냉각재중에는 방사성 핵물질로 Na<sup>24</sup>가 가장 많이 함유되어 있고 Mn<sup>54</sup>, Co<sup>58</sup>, Co<sup>60</sup> 등이 소량 함유되어 있지만 이들 대부분은 반감기가 짧아 원자로의 운전을 정지하면 급격히 방사능 값이 작아진다.

### 2) 나트륨의 물리적 성질 [2, 4-8]

나트륨 화재 특성을 이해하고 나트륨 화재시설을 설계 건설하여 성공적으로 운전하기 위해서 나트륨의 물리화학적 성질을 이해하여야 한다. 나트륨은 지각 표면(주로 바다)에 다량 존재하며 상온에서 냄새가 없는 은회색의 고체이고 액상에서 증기압이 작으며 열안전성과 열전도성이 좋아 고속증식로 및 인공위성용 소형 원자로의 냉각재, 태양에너지 발전소의 열매체등으로 사용되고 있다. 나트륨의 주요 물리적 성질을 요약하면 표 2와 같다.

### 3) 화학적 성질 [2, 4-8]

나트륨은 화학적 활성이 매우 커 공기, 산소 및 물 등과 급격히 반응하고 매우 강한 환원성을 가지며 부식성이 강하여 잘못 취급할 경우 큰 위험성이 따른다.

표 2. 나트륨의 물리적 성질

원자량	22.997	
융점	97.8°C	1기압
융해열	113.3 J/g	1기압
용융시 체적변화	2.5%	
비등점	883°C	1기압
기화열	3750 J/g	1기압
밀도	0.968 g/cm <sup>3</sup>	20°C
	0.856 g/cm <sup>3</sup>	400°C
비열	1.220 J/g	25°C
	1.280 g/cm <sup>3</sup>	400°C
증기압	1.20×10 <sup>-7</sup> mmHg	100°C
	3.7×10 <sup>-1</sup> mmHg	400°C
점도	0.680 CP	100°C
	0.284 CP	400°C
열전도도	1.32 J/(cm °C sec)	20°C
	0.72 J/(cm °C sec)	400°C
전기저항	4.88×10 <sup>-6</sup> Ωcm	20°C
	22.14×10 <sup>-6</sup> Ωcm	400°C

다. 나트륨과 공기와의 반응은 공기의 구성성분인 산소, 수증기, 탄산가스등의 농도에 따라 다른데 각 성분들과의 반응을 표 3에 표시하였다. 표 3에서 나트륨이 산소와 반응할 때 산소공급이 부족할 경우 산화나트륨(Na<sub>2</sub>O)이 생성되고 충분한 경우 과산화나트륨(Na<sub>2</sub>O<sub>2</sub>)이 생성된다. 그리고 나트륨이 물 또는

표 3. 나트륨과 각 공기 성분과의 반응

건조 공기 상태에서의 반응	
2Na + ½O <sub>2</sub> → Na <sub>2</sub> O	ΔH <sub>0</sub> <sup>298</sup> = -100.7 kcal/mole
2Na + O <sub>2</sub> → Na <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	ΔH <sub>0</sub> <sup>298</sup> = -120.6 kcal/mole
과량의 물 또는 수증기와의 반응	
Na + H <sub>2</sub> O(l) → NaOH + ½H <sub>2</sub>	ΔH <sub>0</sub> <sup>298</sup> = -33.7 kcal/mole
Na + H <sub>2</sub> O(g) → NaOH + ½H <sub>2</sub>	ΔH <sub>0</sub> <sup>298</sup> = -45.7 kcal/mole
Na <sub>2</sub> O + H <sub>2</sub> O → 2NaOH	ΔH <sub>0</sub> <sup>298</sup> = -46.7 kcal/mole
이산화탄소와의 반응	
2Na + CO <sub>2</sub> + ½O <sub>2</sub> → Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	ΔH <sub>0</sub> <sup>298</sup> = -175.3 kcal/mole
2NaOH + CO <sub>2</sub> → Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> + H <sub>2</sub> O	ΔH <sub>0</sub> <sup>298</sup> = -40.0 kcal/mole

수증기와 반응할 경우 수소가 생성되는데 이 수소는 생성열에 의하여 공기중의 산소와 폭발적인 반응을 일으켜 물을 생성시킨다. 이러한 폭발이 일어날 경우 미반응의 나트륨이 사방으로 흩어져 더 큰 위험이 따르게 되므로 이를 방지하기 위해서 나트륨이 물 또는 수증기와의 접촉 가능성이 없도록 나트륨시설을 설계할 필요가 있다.

### 3. 나트륨 화재

일반적으로 나트륨관련 시설에서 나트륨이 누설되어 화재가 발생할 때 그 현상에 따라 일반적으로 풀형화재(pool fire), 분무형화재(spray fire)와 조합형화재(combined mixed fire)의 3가지 형태로 구분할 수 있다. 이 화재 형태는 누설 부분의 기하학적 구조, 누설 부위의 모양, 크기 및 위치, 나트륨의 온도, 분출속도 및 분출량, 그리고 누설 나트륨의 상태에 따라 결정된다. 풀형화재는 대량의 나트륨이 누설되어 절연부를 즉시 파괴시키고 나트륨이 분산되지 않은 상태로 급속히 흘러 용기 하부에 풀을 형성하여 화재를 일으키는 것이고 분무형화재는 가압하의 나트륨이 누설부 위에서 분사 확산(jet dispersion)되면서 공기중에서 연소하는 것이다. 조합형화재는 풀형화재와 분무형화재가 조합한 형태로서 이들 화재가 동시에 일어나거나 분무형화재 후 풀형화재가 잇따르는 형태의 화재를 말하는데 화재거동은 주로 누설 부위에서 풀 표면으로의 나트륨 분사 특성에 의해 결정되어 진다. 이 밖에 나트륨이 누설될 때 나트륨이 분사되지 않고 원주 형태로 하강하여 바닥에 풀을 형성하고 이 풀 표면에서 액적이 튀어 화재가 발생하는 원주형 화재(columnar fire)가 있다.

나트륨 화재들은 모두 나트륨 시설에서 누설되어 발생하는 데 표 4에 그 동안 실험용 고속증식로에서 발생했던 누설 부분의 분포를 표시하였다. 표 4에 나타난 바와 같이 밸브 부위가 가장 많이 누설되었음을 알 수 있다.

그동안 많이 연구되어 온 풀형 화재와 분무형 화재에 대해 고찰하면 다음과 같다.

표 4. 나트륨 누설 부위 분포[9]

누설부위	분포(%)
밸브(주로 벨로우 형태)	48
배관	17
배관연결부	15
열교환기	8
펌프	3
기타	9

1) 풀형화재

용융나트륨 풀이 공기중에서 연소될 때 매우 작은 불꽃을 형성하며 타고 연소생성물인 나트륨산화물에 의해 하얀 연기가 발생된다. 저온에서 나트륨을 연소시키기 위해선 열의 공급이 필요하지만 일단 연소가 시작되면 연소반응을 유지시키기에 충분한 반응열이 생성되어 점차적으로 용융나트륨의 온도가 증가된다. 온도가 증가함에 따라 용융나트륨의 전체 표면에 걸쳐 연소가 진행되며 오렌지색의 산화나트륨 피막이 형성된다. 온도가 650-700℃에 도달되면 이 피막은 사라지고 나트륨풀의 표면에 작고 가느다란 불그스레한 불꽃들이 많이 나타난다. 이는 과산화나트륨이 660℃에서 녹기 때문이다.

풀형화재에서 나트륨 발화의 최소온도는 금속의 순수성, 주위가스의 습도, 압력, 용기의 크기, 나트륨의 처리 및 표면상태, 나트륨 표면적과 질량비, 주위온도등 여러 인자들에 좌우된다. Newman[9] 등은 실험을 통하여 나트륨이 탄산가스가 존재하는 습윤공기에 방치되어 표면이 산화물, 수화물, 탄화물 피막으로 덮여있을 경우 발화점이 300-320℃임을 밝혔다. 이는 나트륨 피막의 주요 성분이 수산화나트륨(NaOH)이고 이의 용융점이 318℃이기 때문인 것으로 추산된다. 그러나 나트륨이 건조하고 탄소가스가 없는 분위기에서는 발화온도가 약 200℃까지 낮아지고 똑같은 조건에서 나트륨 풀을 전자석으로 교반할 경우 120-150℃에서 발화가 시작됨을 보였다. 특히 산소농도에 따라서 발화온도가 크게 달라지는데 건조분위기에서 산소농도에 따른 발화온도의 변화를 표 5에 나타내었다. 이 때 발화에 필요한 최소 산소농도는 약 3%로 알려지고 있다.

풀형화재에서는 일차적으로 과량의 나트륨이 산소와 반응하여 산화나트륨을 생성시킨다. 이 때 연소

표 5. 산소농도에 따른 풀형 화재의 발화 온도[11]

산소조성(%)	0.050	0.075	0.100	0.150	0.21
발화온도(℃)	344	255	228	220	205

를 유지시키는 산소가 충분히 존재할 경우 과산화나트륨이 발생하는데 과산화나트륨의 융점(650℃) 이상의 온도에서는 분해하여 산화나트륨과 산소를 생성시킨다. 그리고 연소가스중에 수분이 존재할 경우 나트륨과 급격한 반응을 일으켜 수산화나트륨과 수소가스를 발생시킨다. 또한 연소생성물인 과산화나트륨은 수분과 반응하여 수산화나트륨을 발생시킨다.

풀형화재시 나트륨의 연소는 전체 연소량의 2/3 이상이 기상의 화염 영역에서 연소하여 산화나트륨을 형성시키며 나머지는 나트륨 표면에서 연소하여 나트륨산화물을 생성시킨다. 이 때 발생하는 에어로졸의 대부분은 과산화나트륨이고 수분이 많은 가스 분위기에서 실험할 경우 과산화나트륨과 수산화나트륨의 혼합물임이 밝혀졌다. 전체 나트륨산화물의 약 40%는 에어로졸에서 발견되는데 주로 과산화나트륨으로 이루어져 있다[5]. 연소용기에 잔류한 나머지 나트륨산화물은 주로 소량의 과산화나트륨을 포함한 산화나트륨으로 구성되어 있다. 나트륨 화재 종결 후 전체 연소된 나트륨성분중 과산화나트륨 형태로 연소된 비율은 평균적으로 약 52%이다.

원자로용기와 같은 밀폐 용기내에서 풀형화재가 발생할 때 화재가 진행함에 따라 산소농도는 계속 감소하지만 용기내의 가스 압력 및 온도는 증가하였다가 감소한다. 실제로 고속증식로 운전시 이러한 사고가 일어날 가능성이 많으므로 각국에서는 이에 대한 실험을 많이 행하였다. 풀형화재에 의한 온도 및 압력증가 크기는 초기 산소농도, 화재가 발생하는 용기의 크기, 용융나트륨의 표면적 및 전체누설량 등과 밀접한 관계가 있는 것으로 알려져 있다.

공기중이나 낮은 산소농도 분위기에서의 나트륨 연소속도에 관한 자료는 화재 크기에 따른 에너지 발생량과 이에 따른 압력 및 온도증가량을 추정하는데 필요하다. 그리고 배출가스중 연소된 나트륨 분율 혹은 에어로졸상태의 산화나트륨 누출율에 대한 자료 또한 중요하다. 이것은 고속증식로의 가상사고시

원자로 건물에서 누설될 수 있는 방사성 나트륨의 양을 추정하고 공기 정화계통의 부하량을 결정하는데 중요한 인자중의 하나이기 때문이다. 풀형화재의 연소속도는 여러 측정치들 사이에 많은 차이가 있으나 일반적으로 온도가 증가함에 따라서 평균 연소속도가 서서히 증가하며 연소 표면적이 증가할수록 연소속도가 감소한다. Malet[11]과 Newman[12] 등의 연구에 의하면 연소속도는 대략 20-40kg/m<sup>2</sup>/hr으로 밝혀졌다. 고속증식로에서는 나트륨이 누설되거나 유출될 경우에 발생할 수 있는 나트륨화재 피해를 최소화하기 위해서 나트륨 계통을 둘러싸고 있는 용기내 가스성분중 산소농도를 낮게 하여 사용하고 있다. 따라서 이러한 낮은 산소농도의 분위기에서 나트륨물의 연소속도는 작지만 에너지 및 유해한 에어로졸을 발생시키기 때문에 이에 대한 대책이 필요하다. 이러한 낮은 산소 농도의 분위기에서는 대략 1.8kg/m<sup>2</sup>/hr/O<sub>2</sub>%의 비율로 산소농도에 비례하여 에어로졸 농도가 증가한다.

풀형 화재시 발생하는 에어로졸의 크기는 화재가 진행됨에 따라 크기가 달라진다.

Cherdron 등 [13-15]은 Anderson impactor를 사용하여 에어로졸 크기를 측정하였는데 화재 발생 직후 에어로졸이 0.5 $\mu$ m 크기로 시작하여 10-30sec 사이에서는 대략 0.9 $\mu$ m로, 5분후에는 약 2.35 $\mu$ m로 증가하고 수시간 후에는 다시 0.5 $\mu$ m로 감소하였다. 이때 Na를 기준으로 한 에어로졸 질량농도(aerosol mass concentration)는 화재 후 급격히 증가하여 수분후에 15g/m<sup>3</sup>이 되었다가 기하급수적으로 감소하여 10시간 후에는 0.1mg/m<sup>3</sup>이 됨을 밝혔다.

## 2) 분무형화재[13-16]

분무형화재는 고속증식로의 나트륨 계통에서 가압하에 흐르고 있는 용융나트륨이 배관부의 균열로 말미암아 누설, 분사되어 발생할 수 있다. 이 화재는 용기내에 많은 양의 나트륨 액적(droplet)들의 분사를 초래하여 나트륨 화재중 가장 위험하다. 이는 연소속도가 풀형 화재에 비해 훨씬 빠르고 나트륨 액적들이 분사되면서 연소하여 많은 에너지를 방출시키고 압력과 온도를 급격히 상승시키기 때문이다. 분무형화재의 특성은 나트륨의 누설량과 누설속도, 누설분위기, 나트륨 유출압력, 유출된 나트륨 초기 온도, 용기내의 초기 산소농도, 누설지점의 용기 크

기 및 누설부위의 높이 등에 좌우된다. 분무형화재의 발화온도는 풀형화재에 비하여 낮은데 약 3-4 기압의 압력으로 용융나트륨이 작은 노즐(0.2-0.5mm)을 통하여 공기중에 분사될 때 공기중의 수분에 관계없이 120℃에서 발화한다. 분무형화재에 영향을 끼치는 여러인자중 용기내의 산소농도는 가장 중요한 인자이다. 용기내의 산소농도를 변화시켜 가면서 0.5-40 psig의 분사 압력으로 용융나트륨을 용기에 주입시킬 때 시험용기내의 산소농도가 5% 이하일 경우 분무형 화재가 발생되지 않고, 5-10%일 때 미세 분사일 경우만 화재가 발생하고 10% 이상일 경우 즉각적인 연소가 발생한다. 따라서 나트륨 화재 예방을 위하여 용기내의 산소농도를 5%로 제한하고 용기벽의 온도를 낮출 필요가 있다.

분무형화재도 풀형화재와 마찬가지로 공기와의 반응을 통한 주요생성물들은 산화나트륨과 과산화나트륨들이다. 미세 액적으로 용기에 분산된 나트륨의 외각 부분은 주위에 충분한 산소와 반응 연소되어 과산화나트륨이 즉시 형성되고 내부는 산소가 부족하여 산화나트륨이 생성되는 것으로 알려져 있다. 그러나 산소가 주위에 충분히 존재할 경우 산화나트륨은 다시 산소와 반응하여 과산화나트륨이 된다. Cherdron[15] 등은 나트륨 분무 화재실험을 통하여 주요 반응생성물이 과산화나트륨임을 밝혔다. 즉, 분무화재시 나트륨이 많은 경우에 산화나트륨이 생성되고 산소가 충분할 경우는 과산화나트륨이 생성된다. 또 고온의 산화나트륨이 산소와 접촉할 경우는 과산화나트륨을 생성시킨다. 그리고 용기내 가스가 수분을 함유하고 있을 경우 산화나트륨은 수분과 반응하여 수산화나트륨의 액적을 형성한다. 또한 공기중에 탄산가스가 존재할 경우 수산화나트륨 에어로졸은 다시 공기중의 탄산가스와 반응하여 탄산나트륨을 즉시 생성시킨다.

표 6은 Cherdron 등 [14]이 0.5m<sup>3</sup> 용기에 450℃의 용융나트륨을 450g 주입하였을 때 산소농도 증가에 따른 압력증가 현상을 나타낸 것이다. 일반적으로 산소농도가 증가함에 따라 용기내 압력이 증가함을 알 수 있고 또한 용기내 온도도 증가한다. 그리고 분무형 화재에서 나트륨량이 산소와의 화학양론적 반응량보다 적게 분출되는 경우 분출 나트륨량과 용기내 존재하는 산소의 몰비가 증가함에 따라 용기에 분산시킨 단위 나트륨량에 대한 압력이 증가한다. 한

편 분무형화재의 중요한 변수가 되는 에어로졸의 평균 질량의 크기(aerosol mass mean diameter, AMMD)는 약 4 $\mu$ m가 되지만 Na 주입량에 따라 차이가 있음이 밝혀졌다. Cherdron 등 [13-14]은 20kg의 나트륨 주입시 에어로졸 크기가 주입 2분후 1.7 $\mu$ m에서 20분후에 2.2 $\mu$ m가 되지만 40kg 주입시는 2분후 4.8 $\mu$ m까지 커짐을 밝혔다. 이 때 에어로졸 질량 농도는 처음 1분동안 200g/m<sup>3</sup>까지 증가하였다가 급격히 감소하여 30분후에는 이 양의 1/1000로 감소하였다.

표 6. 산소 농도에 따른 분무 화재의 최대 도달 압력 [14]

최기산소농도 (vol. %)	최대도달압력 (psig)	최대압력도달시간 (sec)
21.0	38	6
10.5	34	10
5.3	26	21
0.6	8	8

#### 4. 각국의 화재 연구 현황

나트륨은 자연에서 공기와 물등 주위 물질들과 반응하기 때문에 단일금속으로 존재하지 않는다. 이렇게 화학적으로 활성이 강한 나트륨을 냉각재로 사용하는 고속증식로는 일반 원자로와 달리 고온의 나트륨이 유출되어 주위의 공기나 물과 반응하여 발생하는 가상의 나트륨화재 사고에 대처하고 소화시킬 수 있는 구조로 설계되어야 한다. 따라서 고속증식로 기술개발에 관심을 갖고 있는 나라들에서는 일찍부터 이에 대한 연구가 활발히 이루어져 왔다. 이들 국가별로 나트륨화재 특성에 대한 연구 현황을 조사하였고 표 7에 각국의 나트륨화재 실험현황을 요약 정리하였다.

##### 1) 일본 [17-25]

일본은 60년대 말부터 JOYO 실험로(100MWt, 1977년 임계)의 설계 안전성분석을 위해 일본 원자력연구소를 중심으로 풀형화재 연구를 시작하였으며 70년대에는 MONJU 원형로(280MW<sub>e</sub>, 1992년 임계

목표) 설계 건설에 초점을 맞추어 PNC(Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation) 와 Hitachi 및 Mitsubishi회사등에서 풀형, 분무형, 원주형의 나트륨화재 및 나트륨 에어로졸 거동 연구를 수행하였고 최근에는 Minatoku에 위치한 대규모 나트륨화재 시험시설인 SAPFIRE를 건설하여 나트륨 누설시 여러가지 형태의 화재 실험 연구, 나트륨화재 완화계통(mitigation system) 개발, 나트륨 화재에 의한 고속증식로 전자감시장치 및 재료의 영향 평가, 사고후 잔열제거 계통의 주요 구성요소들의 신뢰도 연구를 추진중에 있다.

##### 2) 프랑스 [26-33]

프랑스에서는 50년대부터 나트륨 냉각재 기술과 더불어 고속로 개발을 착수하여 실험로 Rapsodie (40MW<sub>t</sub>, 1967년 임계)를 시초로 원형로 Phenix (250MW<sub>e</sub>, 1973년 임계)를 건설하고 이어서 이탈리아 및 서독등과 더불어 실증로 Superphenix (1240MW<sub>e</sub>, 1985년 임계)를 건설하여 현재 운전하고 있다. 따라서 고속로 개발과 병행하여 1972년 프랑스 원자력위원회(AEC)는 나트륨 화재에 대한 이론 및 응용연구를 시작하였으며 Cadarache에 여러가지 나트륨화재 실험시설들을 건설 운전하여 고속로에서 발생가능한 풀형화재, 분무형화재 및 조합형화재로 인한 시험용기의 압력과 온도증가등을 추정하는 모델 개발, 이들 화재들의 소화법연구, 화재에서 발생하는 나트륨 에어로졸과 원자로 재료와의 반응 연구, 사고시 원자로 구성 성분의 영향 평가등에 관해서 많은 연구를 수행하여 왔다. 또한 프랑스는 Superphenix와 같이 대형 고속증식로의 안전성 확보 및 후속기 건설을 위한 안전성 연구개발을 목적으로 이탈리아와 함께 Esmeralda project를 통하여 대형 화재 시험시설을 건설하여 화재 실험을 수행하였다. 이 화재 시험시설의 시험용기 크기는 3600m<sup>3</sup>으로 Superphenix 원자로를 기준한 것이다.

##### 3) 서독 [13-15, 34-38]

서독에서는 실험로 KNK-II (20MW<sub>e</sub>, 1977년 임계) 및 원형로 SNR300(330MW<sub>e</sub>, 준공보류)의 건설을 시작으로 70년대 초부터 본격적으로 나트륨 화재 및 에어로졸거동 연구를 착수하여 NABRAUS

표 7. 각국의 Na 화재 실험 현황

회사 혹은 연구소명	시험용기	시험용기 재질	모형화재 형태	실험변수	실험측정 인자	실험해석	비 고	참고 문헌
JAERI (일본)	○3.2m <sup>3</sup> (1.5mD×2.2mH)	○스테인 스강	○Pool	○Pool area (0.075-0.3m <sup>2</sup> )	○온도	○연속속도	○Joyo 실험로 안전성분석	[17]
			fire -주입식	○초기 산소농도 (5.2-21%) ○Na주입온도 (250-500℃)	○가스압력 ○산소농도 ○습도	및 연소반응열 계산		[18]
Hitachi (일본)	○1.93m <sup>3</sup> (1.0mD×2.8mH)	○탄소강	○Spray	○초기 산소농도 (0-21%)	○온도	○SOFIA-2	○소형시험용기 모델링에 적합	[18]
			-상향식 -2.2mm nozzle	○Na주입속도 (30-50g/s) ○Na주입온도 (300-530℃)	○가스압력 ○산소농도 ○aerosol size	-압력, 온도 계산 -aerosol 크기고려		[19]
Mitsubishi (일본)	○21m <sup>3</sup> (3mD×3mH) ○Catching 직경 (2.2m) ○설계압력 (4bar)	○Steel lined concrete	○Columnar & pool fire -하향식	○초기 산소농도 (0.5-21%) ○Na주입온도 (400, 530℃) ○Na주입량 (0.05, 0.5, 1m <sup>3</sup> )	○온도 ○가스압력 ○산소농도변화	○SOFIRE -MII -압력, 온도 계산 -US code SOFIRE -II변형	○Monju 원자로에서 Na leak 분석	[18] [23]
			○Pool fire -주입식	○초기 산소농도 (0.5, 0.1%) ○Na주입온도 (400℃) ○Na주입량 (0.5m <sup>3</sup> )	○가스압력 ○온도			
PNC- SAPFIRE facility (일본)	○80m <sup>3</sup> (3.6mD×9mH) ○SOLFA-2 ○Water jacket	○스테인 스강	○Columnar fire -하향식	○Na주입온도 (505℃) ○Na주입속도 (3.1cm/s)	○온도 ○가스압력	-	○Monju 배관부 누설모사 ○Test of components and monitors in Na fire	[20] [21] [22] [23]
			○Na 누설 화재	○Na주입시간 (13min)	○화재형태관찰			
	○175m <sup>3</sup> (5m×5m×7m) ○SOLFA-1	○Rein- forced concrete ○Steel	○Pool fire		○온도 ○Pool opening ratio 변화에 따른 화재 발생열	○ASSCOPS -용기 측면벽 및 상부벽 온도 -Large Scale Engineering Test	○Fire Mitigation System 개발 ○Na 화재 및 에어로졸 기본연구	
			○Steel					
CEN Cadarache (프랑스)	○3.7m <sup>3</sup> (1mD×4.36mH) ○8 bar overpressure ○4 sight glasses	○Steel	○Pool fire	○Na주입량 (0.4-5.25kg) ○Na주입온도 (550℃)	○온도 ○가스압력 ○산소, 수소 및 수분농도 ○화재생성물 분석	○PULSAR -confined space -온도압력 추정 -aerosol 거동	○고속중식으로 안전성 해석	[26]

회사 혹은 연구소명	시험용기	시험용기 재질	모형화재 형태	실험변수	실험측정 인자	실험해석	비 고	참고 문헌
CEN IPSN/ DEMT (프랑스)	○4.4m <sup>3</sup> (1.6mD×2.2mH) ○연소 Pan (0.125m <sup>2</sup> )	○Steel	○Pool fire -주입식 ○EMIST test	○Na주입량 (9.2-9.9kg) ○Na주입온도 (420-480℃) ○산소농도 21%	○온도(Na, gas, Vessel wall) ○가스압력 ○산소소모량	○AEROSOLS /A1 ○AEROSOLS /A2 ○AEROSOLS /A3	○EMIS Test -시험용기내 Pool fire 에어로졸 연구	[27]
CEN Cadache (프랑스)	○4.4m <sup>3</sup> ○연소 pan -0.4mD ○Removable horizontal	○Steel	Pool fire -주입식	○Na주입온도 (275℃) ○Na주입량 (9.5kg) ○산소농도 21%	○온도 ○압력 ○가스조성 ○에어로졸특성	○AEROSOLS A2 -에어로졸크기, 규명 농도, 침강 속도 추정	○Na fire 에어로졸	[28]
CEN Cadache (프랑스)	○4.5m <sup>3</sup> (1mD×5.50mH) ○8mm thickness	○Steel	○Combined fires -하향식 ○Ejection- 100mm pipe breakage	○Na주입속도 (0.5-5kg/g) ○Flow duration (10-60-120s) ○초기산소농도 (0-2%) ○Na주입온도 (220-550℃)	○온도 ○압력(최고압력 -2.1bar) ○산소농도 ○Na분출양 및 분출시간	○ZERO D model	○원자로용기 설계안전성	[29]
CEA Cadache -Esmeralda project (프랑스)	○360m <sup>3</sup> (20×15m×12m) ○1 bar overpressure	○Conc- rete	○Pool fire -주입식	○Na온도 (530, 550℃) ○Na주입량 (1000, 5000g) ○Pool area (9.49m <sup>2</sup> ) ○환기계통, 폐쇄, 산소주입	○온도 ○압력 ○산소농도 ○에어로졸측정	○PYROS -압력, 온도, 산소농도추정 ○AEROSOL -Cell aerosol behaviour	○고속증식로 Na취급 안전성 ○대형화재실험	[30] [31] [32]
KfK -NABRAUS facility (독일)	○4m <sup>3</sup>	○Steel	○Pool fire -가열식	○산소농도 (0-22%) ○Na pool속의 Cs, Sr 양	○에어로졸 농도 및 크기 ○에어로졸과 pool의 잔류 Cs, Sr 양		○LMFBR 1차 계통수누설시의 핵분열화합물 거동분석	[34]
KfK -FAUNA facility (독일)	○22m <sup>3</sup>	○Steel	○Pool fire -하향식 -270 holes (4mm) ○습도 (30, 60, 90%)	○Pool area (2-12m <sup>2</sup> ) ○압력, 산소농도 일정유지 ○Na주입온도 (500℃) ○Na주입량 (7-40kg) ○Na주입시간 (2-3 sec)	○에어로졸 농도 및 크기 ○에어로졸성분 ○온도 ○에어로졸 농도 및 크기 ○에어로졸성분	○PARADISEKO IIIb ○최고가스온도 -1400℃ (Na jet부근)	○Na에어로졸 거동연구 ○Na에어로졸 거동연구	[14]



회사 혹은 연구소명	시험용기	시험용기 재질	모형화재 형태	실험변수	실험측정 인자	실험해석	비 고	참고 문헌
KfK -FAUNA facility (독일)	○220m <sup>2</sup> ○3bar overpressure ○external water cooling (max. 150°C)	○Steel	○Pool fire -가열식	○Pool area (2, 12m <sup>2</sup> ) ○환기상태 -폐쇄 혹은 산소주입 ○Na주입량 (250, 500g) ○Spray fire -상향식 -special ejection device ○Nozzle크기 (4.8mm) ○Na주입온도 (500°C)	○온도 ○압력 ○산소농도 ○에어로졸측정 (크기, 농도) ○온도 ○압력 ○산소농도 ○에어로졸특성 (크기, 농도, 조성) ○Na주입온도 (500°C)	○PARADIS- EKOV -Pool & spray fire -aerosol 농도추정 -밀폐 system ○PULSA -Spray fire -온도, 압력 -밀폐 system		[13] [15] [35] [36]
Atomic Intern- ational (미국)	○68.6m <sup>2</sup> (3.05m D × 6.63mH)	○탄소강	○Pool fire -가열식 -면적 : 0.43m <sup>2</sup> -깊이 : 25mm	○초기산소농도 (21%) ○Na주입량(11 l) ○Na온도(510°C)	○온도 ○압력 ○산소농도 ○에어로졸특성	-	○고속로 안전성 해석	[39]
Atomic Intern- ational (미국)	○0.62m <sup>2</sup> (3.3mD × 9.9mH) -LMFBR의 1/10 크기 -One-cell test	○Steel	○Pool fire -주입식	○Pool area (0.56m <sup>2</sup> ) ○Na주입온도 (540, 600°C) ○Na주입량(23kg) ○초기산소농도 (2-21%)	○압력 ○온도 ○산소농도 ○에어로졸성분	○SOFIRE II	○LMFBR 용기설계	[40]
HEDL, Westing- house (미국)	○95m <sup>2</sup>  ○850m <sup>2</sup> (7.62m D × 20.3mH) ○설계압력 : 0.517 MPa gauge	○탄소강	○Pool fire -주입식 -5.25mm ID pipe 주입관 -burn pan (13.7-43.2cm)	○초기산소농도 (21%) ○Pool area (1.0, 2.9m <sup>2</sup> ) ○Pool depth 분석 ○Na주입온도 (582-604°C) ○초기산소농도 (21%) ○Pool area (4.4m <sup>2</sup> ) ○Na주입온도 (600°C)	○온도, 습도 ○압력 ○산소농도 ○반응생성물 분석	○SOFIRE -II -온도, 압력 반응량, 연소속도 추정	○LMFBR 안전성 분석 -FFTF 2차재 화재보호 계통설계 : mockup실험	[41]
HEDL, Westing- house (미국)	○850m <sup>2</sup>	○탄소강	○Spray fire -하향식 -15.8mm ID 주입관 사용 ○Nozzle크기 (Na drop 크기)	○초기산소농도 (21%) ○Na주입 온도, 속도, 양, 시간 ○반응생성물 분석	○온도, 습도 ○압력 ○산소농도 ○반응생성물 분석	○SPRAY code -온도, 추정		

회사 혹은 연구소명	시험용기	시험용기 재질	모형화재 형태	실험변수	실험측정 인자	실험해석	비 고	참고 문헌
HEDL, Westing-house (미국)	○850m <sup>3</sup>	○탄소강	○Spray fire -하향식 -1.27cm pipe (sched-ule40) -Spray nozzle	○초기 산소농도 (21%) ○Na주입속도 (253, 304kg/sec) ○Na주입온도 : (542℃) ○Nozzle 압력 41-90kPa	○온도 ○습도 ○압력 ○산소농도 ○aerosol 측정	○NACOM code -온도, 압력, 산소농도	Spray fire code 검증	[42]
UKAEA (영국)	○26m <sup>3</sup> (3.6m×2.4m×3.0m)	-	○Pool fire -2.54, 5.08cm pipe -상압운전 ○Pool area -최대 1m <sup>2</sup> ○Na 온도 -500℃	○소화제시험 ○에어로졸측정 ○방호부시험	-	○Na화재재현 ○Na-Concrete 반응시험		[44] [45] [46] [47] [54]
간디 원자력 연구센터 (인도)	○0.11m <sup>3</sup> (0.4mD×0.8mH)	-	○Pool fire -가열식	○Pool area (7-400m <sup>2</sup> ) ○Na주입량 (9-400g) ○산소농도 (1.3-21%) ○연소시간 (340sec)	○Aerosol release rate ○Pool온도	-		[52] [53] [54]

(4m<sup>3</sup>), NALA(2.2m<sup>3</sup>), FAUNA(220m<sup>3</sup>)등의 시험시설을 활용하여 이 분야에 많은 연구를 이룩하였다. 특히 80년대에는 FAUNA 시설을 이용하여 풀형 및 분무형 화재실험을 행하였고 나트륨 에어로졸 측정 감시장치를 자체 개발하여 나트륨화재시 에어로졸 거동 실험 및 이의 거동을 추정하는 모델을 개발하였다. 최근에는 원형로 SNR300의 운전 인허가가 나지 않아 나트륨 화재에 대한 연구가 일시 정제하였으나 현재는 프랑스, 영국, 서독, 이탈리아, 벨지움과 함께 유럽 통합 실증로의 공동설계에 참여하여 이들 국가들과 FAUNA 시설을 공동으로 활용하여 EFR의 안전성에 대한 나트륨화재 연구를 진행시키고 있다.

4) 미국 [39-43]

미국은 1940년대 초에 세계 최초로 고속증식로 개

발을 시작하여 실험로 Clementine(25KWt, 1946년 임계)를 시초로 그 후 많은 실험로를 건설 운전한 경험이 있고 지금도 실험로 EBR-II (20MWe, 1963년 임계), FFTF(400MWt, 1980년 임계)를 순조롭게 운전하고 있다. 따라서 미국은 일찍부터 고속증식로의 안전성 분석을 위해 나트륨화재 연구를 시작하여 80년대 초까지 Atomics International, Westinghouse 등에서 풀형 및 분무형화재시 시험용기의 온도와 압력변화등을 예측할 수 있는 코드의 개발을 비롯하여 이 분야에 많은 연구를 이룩하였으나 그 후 고속증식로 개발 사업이 한동안 중단되어 Na화재 연구가 침체되었었다. 그러나 근년에 와서 고유의 안전성을 띤 PRISM(155MWe, GE사), SAFR(450MWe, RI사)등 신형 액체금속 냉각로(LMR) 계획을 추진하고 있어 Na화재 연구가 소생될 전망이

다.

### 5) 영국[3-5, 12, 44-48]

영국은 1950년대 초반 고속로 개발을 착수하여 실험로 DFR(15MWe, 1950년 임계)을 건설 운전하였고 이어 원형로 PFR(270MWe, 1974년 임계)을 건설하여 현재 운전중에 있다. 따라서 영국의 CEBG(Berkeley Laboratories), NNC(National Nuclear Corporation), 그리고 UKAEA를 중심으로 Na 화재 연구를 추진하여 왔지만 1988년도 영국 정부가 고속증식로 연구개발에 대한 정부투자를 감축하면서 이에 대한 연구가 위축되었다. 현재는 유럽 통합 고속로 개발에 참여하여 EFR의 안전성 확보를 위한 나트륨 화재연구를 추진하고있다. 영국에서는 화재특성 연구, 나트륨에어로졸 거동 연구, 나트륨화재 예방 및 제어기술 개발, 나트륨 에어로졸에 의한 고속증식로 구성요소의 영향등에 관한 연구를 수행하여 왔는데 특히 나트륨-수증기 반응 및 나트륨 에어로졸에 대해 많은 연구를 수행하여 왔다.

### 6) 이탈리아[49-51]

이탈리아는 1964년 유럽 원자력 협력체(EURATOM)의 가입시부터 ENEA를 주축으로 고속증식로 개발을 착수하였다. 1973년에는 실험로 PEC(123MWt) 설계 건설을 시작하여 원자로 용기가 완성되고 그 밖에 주요 부품이 완성단계에 이르렀지만 현재 중단상태에 있다. 그리고 프랑스, 서독과 함께 현재 상용으로 운전되고 있는 Superphenix 건설에 참여하였다. 이러한 원자로 기술개발과 병행하여 Na 안전성 기술개발도 수행하였다. 특히 80년대 초부터 프랑스가 주도하는 대규모 화재 실험계획인 Esmeralda project에 참여하여 상용 고속증식로에서 가상의 대규모 화재에 대한 공동연구를 수행하였다. 이탈리아는 자체적으로 나트륨화재 시험시설을 가지고 있지 않으나 프랑스가 보유하고 있는 시험 시설을 이용하여 나트륨화재 특성연구를 수행하고 있다. 최근에는 유럽공동체의 후원하에 프랑스의 Pluton 화재시험시설(용적: 400m<sup>3</sup>)을 활용하여 나트륨화재시 여러 에어로졸 측정장치의 성능을 평가하고 에어로졸의 형상 효과(shape factor)의 영향을 조사 연구하였다.

### 7) 인도[52-54]

인도에서는 근래 고속증식로 기술개발에 관심을 두어 그 일단계로 소규모의 풀형 실험장치(0.4mD x 0.8mH)를 만들어 나트륨화재 실험을 행하고 있다. 이들의 주요관심사는 풀형화재시 에어로졸 발생량인데 이에 대한 나트륨온도 및 사용량, 나트륨풀의 면적 및 깊이, 공기주입속도, 산소농도, 상대습도들의 영향을 주로 조사 연구하였다. 그리고 나트륨 화재 발생시에 이를 진화시키는 소화제 성능 평가 연구를 수행한 바 있다.

## 5. 결 론

나트륨은 냉각재 및 열매체로서의 핵적, 물리적, 화학적 성질이 뛰어나 고속증식로 및 소형 인공위성의 원자로등에서 냉각재로 채택되어 사용되고 있다. 이 나트륨은 화학적 활성이 매우 강하여 나트륨 관련 시설에서 누설될 때 조건에 따라서 풀형화재, 분무형 화재, 조합형 화재 및 원주형 화재등을 초래하여 온도와 압력이 상승하고 에어로졸을 발생시키므로 기기 및 장치의 훼손과 오염, 원자로 용기의 파괴등의 문제를 야기시킬 수 있다. 이러한 나트륨 화재에 대비하여 고속증식로를 개발한 국가나 현재 개발중에 있는 국가에서는 일찍부터 나트륨 화재특성 연구를 수행하여 화재 예방 및 소화 방법 수립, 안전 설계 반영으로 고속증식로의 나트륨 화재에 대한 안전성을 확보하였고 지금도 계속하여 안전성 향상에 대한 연구를 진행중에 있다. 따라서 고속증식로를 21세기의 주요 에너지원으로 계획하고 있는 우리나라는 고속증식로의 기초 기술의 하나로 나트륨 화재 특성 및 안전 대책 연구를 지속적으로 추진시켜야 하겠다.

## 참고문헌

1. 조 만, "고속증식로", 한국에너지연구소 회보, 9, pp.138-169 (1989).
2. J.L. Ballif, "Liquid Metals Fire Control Engineering Handbook", HEDL-TME-79-17.

- Westinghouse Hanford Company, Richland, WA99352 (1979).
3. E. Voice, "Sodium As a Fast Reactor Coolant Reactor. Its choice and Chemistry", Reactor Division, AEA Technology (1976).
  4. A.W. Smith, "Basic Sodium Technology", Reactor Division, AEA Technology (1976).
  5. C. Robertson et al., "Storage, Handling and Disposal of Sodium and Sodium Potassium Alloys", AECF 500, UKAEA (1989)
  6. O.J. Foust et al., "Sodium-Nak Engineering Handbook", Vol. I, Gordon and Breach, Science Publishers, INC., NY (1972).
  7. J. Higson, "The Chemistry of Burning Sodium and Its Extinguishment", Safety Problem Related to Sodium Handling in Liquid Metal Fast Breeder Reactor and Large Test Facilities, edited by H.M. Kottowski, Harwood Academic Publisher, pp.75-101 (1980).
  8. 조만 등, "고속증식로 냉각재 안전연구(I)-나트륨 화재 특성 연구", 제1차 중간보고서, 한국전력공사 (1990).
  9. E. Peppler, "Sodium Fires and Extinguishment", Safety Problem Related to Sodium Handling in Liquid Metal Fast Breeder Reactor and Large Test Facilities, edited by H.M. Kottowski, Harwood Academic Publisher, pp.103-142 (1980).
  10. S. Jordan et al., "Sodium Aerosol Behaviour in Liquid-Metal Fast Breeder Reactor Containments", Vol.81, pp.182-192, Nuclear Technology (1988).
  11. J.C. Malet, "Ignition and Combustion of Sodium Fires", Safety Problems Related to Sodium Handling in LMFBR and Large Test Facilities, edited by H.M. Kottowski, Harwood Academic Publishers, pp.142-175 (1981).
  12. R.N. Newman, "The Ignition and Burning Behaviour of Sodium Metal in Air", Progress in Nuclear Energy, Vol.12, No.2, pp.119-147 (1983).
  13. W. Cherdron, H. Bunz, and S. Jordan, "Properties of Sodium Fire Aerosols and Recalculation of Their Behaviour in Closed Containments", KfK-3800, pp.395-406 (1984).
  14. W. Cherdron and S. Jordan, "Physical and Chemical Characterization of Sodium Fire Aerosols", Proceedings of the LMFBR Safety Topical Meeting, pp.Ⅲ-71 - 79, Lyon, France (1982).
  15. W. Cherdron and J. Charpenel, "Thermodynamic Consequences of Sodium Spray Fires in Closed Containers, Part 1-Experiments", KfK-3829 (1985).
  16. T.S. Krolikowski., "Violently Sprayed Sodium-Air Reaction in an Enclosed Volume", ANL-7472 (1968).
  17. "나트륨 화재 모델 시험", KAERI-M 6073, 일본 원자력연구소 (1975).
  18. N. Mitsutsuka and N. Yoshida, "Japanese Studies on Sodium Fires", Design and Testing, IWGFR/43, p.43 (1982).
  19. R. Kawabe and A. Suzuoki, "Experiments and Analyses of Sodium Spray Combustion", Proceedings of the LMFBR, Safety Topical Meeting, Vol.Ⅲ, p.65, Lyon, France (1982).
  20. Y. Himeno, "Current Status of Sodium Fire and Aerosol Research in Japan", Specialists' Meeting on Sodium Fires, IWGFR/67, pp.149-160 (1989).
  21. Y. Himeno et al., "Development and Demonstration of Sodium Fire Mitigation System in the SAPFIRE Facility", *ibid.*, pp.135-147 (1989).
  22. M. Mori, "Development and Validation of Sodium Fire Codes", *ibid.*, pp.259-269 (1989).
  23. T. Sano, Y. Abe, and T. Kyodawa, "Energy Release from Sodium Spray Combustion", Proceedings of the LMFBR, Safety Topical Meeting, Vol.Ⅲ, p.13 (1982).
  24. Y. Himeno, S. Miyahara, and T. Kinoshita, "Test Plan for Aerosol Behaviour in the SAP-

- FIRE Facility", KfK-3800 (1984).
25. Y. Himeno, S. Miyahara, T. Mori, and K. Sasaki, "Engineering Scale Test on Sodium Leak and Fire Accident and Its Consequences in Auxiliary Building of Fast Breeder Reactor", 4th Int. Conf. on Liquid Metal Eng. & Tech., Avignon, France, p.202-1 (1988).
  26. J.C. Malet et al., "French Position Paper on Sodium Fires", Design and Testing", IWGFR/43, p.23 (1982).
  27. J. Femandjian et al., "Sodium Oxide Aerosol Behaviour in a Containment Vessel Experimental Tests and Computer Models", Proceedings of the LMFBR Safety Topical Meeting, Lyon, France, Vol. III, p.121 (1982).
  28. C. Casselman and J.C. Malet, "Experimental Study of Sodium Pool Fire Aerosol Behaviour Comparison with Calculation Code", KfK-3800 (1984).
  29. J. Charpenel et al., "Combined Sodium Fires-Experiments and Code Developments", Science and Technology of Fast Reactor Safety, BNES, London, p.65 (1986).
  30. Y. Sophy et al., "The Esmeralda Project for Studying Extensive Sodium Fire", Proceedings of the LMFBR Safety Topical Meeting, Lyon, France, Vol. III, p.171 (1982).
  31. J.C. Malet et al., "Sodium Fires : French Strategy-Theoretical and Experimental Developments Proceedings of Fast Reactor Safety", p.921 (1985).
  32. K.R. Rzekiecki et al., "Large Sodium Pool Fires in a Closed or in a Naturally Vented Cell", Science and Technology of Fast Reactor Safety, BNES, London, p.65 (1986).
  33. J.C. Malet, "French Research on General Approach to Sodium Fires", Specialists' Meeting on Sodium Fires, IWGFR/67, pp 221-236 (1989).
  34. S. Jordan, "Release of Fission Products from Contaminated Sodium Fire", Vol.IV, p.1955 (1976).
  35. W. Cherdron and S. Jordan, "Thermodynamic Consequences of Sodium Spray Fires : Experiments and Calculations Liquid Metal Engineering and Technology", BNES, London, p.309 (1984).
  36. W. Cherdron, S. Jordan, and W. Lindner, "Sodium Fire Particles-Chemical Transformation and Properties", *ibid*, p.287 (1984).
  37. W. Cherdron et al., "Sodium Fire Research Program for SNR Safety in the FRG", Specialist' Meeting on Sodium Fires, IWGFR/67, pp.38-42 (1989).
  38. K.F. Freudenstein, "Effects of Sodium Fires on Structures and Materials-Practical Experience with Sodium Leakage Accidents", *ibid*, pp.91-96 (1989).
  39. R.P. Johnson et al., "Characterization of Sodium Pool Fires", ANL-7520, Part1, p.195 (1968).
  40. L. Baumash, C. Nelson, and R. Johnson. "One-cell and Two-cell Sodium Pool Fire Tests", CONF-761001, p.488 (1976).
  41. R.K. Hillard, "Summary of HEDL Sodium Fire Tests", HEDL-SA-1669 (1978).
  42. D.W. Jeppson and L.D. Muhlestein, "Large Scale Sodium Spray Fire Code Validation Test", Proceedings of Fast Reactor Safety, Vol. III, p.927 (1985).
  43. R.T. Lancet et al., "United States Position Paper on Sodium Fires Design Basis and Testing", Specialists' Meeting on Sodium Fires, IWGFR/67, pp.194-220 (1989).
  44. M.H.E. Ball et al., "Small-Scale Sodium Fire Experiments to Investigate the Effect of Humidity on Aerosol Size Distributions and Concentrations", AEA-TRS-R5011, AEA Technology (1990).
  45. M.H.E. Ball, "Dynamic Shape Factor Measurements of a Sodium Fire Aerosol at the CEC Sponsored TVMA Experiment, held at CEN Cadarache on 17 May 1988", AEEW-R2453 (1988).

46. M.H.E. Ball, "SOFA-5 Sodium Fire Experiment : Measurements of Aerosol Using a Real Time Aerodynamic Particle Size Analyzer", AEEW-M2606 (1989).
47. R.N. Newman, G.J. Vaughan, and K.Hargreaves, "A Review of Work Status in the United Kingdom", IWGFR/43, pp.49-62 (1982).
48. G.J. Vaughan and D.Hodgson, "Design Provisions to Prevent Sodium Fires", Proceedings of the International Topical Meeting on Fast Reactor Safety, Vol.II, pp.911-919 (1985).
49. A. Gerosa, "Italian Position Paper on the Safety Analysis of Liquid Metal Fast Breeder Reactors as Related to Sodium Fires", IWGFR/43, pp.35-42 (1982).
50. R. Caponetli, "Personal and Area Monitors for Sodium Aerosols". 4th International Conference on Liquid Metal Engineering and Technology, Avignon, France, pp.205-1-7 (1988).
51. G. Taroni, C.M. Castellani, and T. De Zaiacomo, "Morphological Analysis and Evaluation of Dynamic Shape Factor of Particles Produced in a Real Scale Sodium Fire", J. Aerosol Science, Vol.20, No.8, pp.1409-1412 (1989).
52. R.K. Singh Raman et al., "Smoke Release Behaviour of Burning Pools of Liquid Sodium", Nucl. Eng. Design., Vol.98, p.9 (1986).
53. F.C. Parida et al., "Experimental Investigation of Aerosol Release Behaviour From Sodium Pool Fires", 4th International Conference on Liquid Metal Engineering and Technology, Avignon, France, pp.204-1-204-6 (1988).
54. C. Raju et al., "Status of Studies on Sodium Fires and Protection Systems, in Indian LMFBR Programme", Specialists' Meeting on Sodium Fires, IWGFR/167, pp.270-281 (1989).
55. "Dounreay Experimental Sodium Facilities", AEA Technology (1991).