

《기술보고》

나트륨-콘크리트 반응 연구 현황

배재훈 · 민병훈 · 김수만

수원대학교

최종현 · 조병렬 · 김태준 · 황성태

한국원자력연구소

(1995. 9. 18 접수)

요 약

액체금속로의 안전설계 및 안전해석에 있어서 고려되어야 하는 용융나트륨과 콘크리트 반응의 특성, 그리고 이들 반응의 모델을 조사 분석하였고 액체금속로 개발 선진국들의 나트륨-콘크리트 반응연구 현황을 검토 분석하였다. 그리고 나트륨-콘크리트 반응은 매우 복잡하여 액체금속로 개발 선진국에서 이의 반응 연구를 꾸준히 진행하고 있고 액체금속로의 안전설계 및 안전운전을 위하여 보다 완벽한 반응모델을 개발하고자 노력하고 있어 우리나라에서 액체금속로 개발을 추진하기 위한 앞으로의 나트륨-콘크리트 연구방향을 제시하였다.

1. 서 론

액체 금속로는 기존의 원자로와 같이 열중성자를 사용하지 않고 고속중성자를 사용하며 운전중 U-235나 U-238이 중성자를 흡수하여 생성되는 Pu-239가 20% 정도로 농축된 핵연료를 사용한다. 그리고 냉각재로는 기존원자로의 경수 및 중수 대신에 중성자 흡수능력이 적은 나트륨을 사용하고 있다. 액체 금속로의 냉각재로 사용되는 용융나트륨은 화학적으로 매우 활성이 커서 물이나 공기와 접촉하였을 때 격렬한 화학반응을 일으켜 열을 발생시키고 가연성 가스인 수소를 발생시킬 수 있다. 따라서 나트륨의 반응을 방지하기 위하여 액체 금속로의 구조물 재료는 거의가 스테인레스강으로서 이루어져 있고 Na냉각재의 누출을 최소화하고 만약의 누출에 대비하여 원자로 용기를 여러 겹으로 구성하는 다중 방호 시스템을 사용한다. 위와 같이 액체 금속로는 반응성이 큰 고온의 용융 Na의 누출에 대비하기 위한 여러 안전장치가 마련되어 있다. 그러나, 액체 금속로 냉각계통에서 용융 나트륨의 누설은 그 확률이 극히 적지만 액체금속로 개발시 이에 대한 안전대책의 강구가

있어야 한다. 이것은 나트륨이 누설될 경우 공기와의 반응으로 인한 나트륨 화재가 발생할 수 있고 고온의 누설 Na과 원자로 구조체인 콘크리트와의 반응과 열효과로 인한 구조물의 파손과 이때 발생하는 수소에 의한 원자로 용기의 압력 증가 혹은 수소 폭발 화재, 그리고 방사성오염 물질의 누출 등 액체금속로 안전성에 심각한 위험을 초래하기 때문이며 이를 고려하여 원자로를 설계하고 대비책을 세울 필요가 있다. 이에 따라 액체금속로 개발의 선진국들은 일찍부터 액체금속로 개발의 기반 기술의 하나로 Na누설방지와 누설시 일어날 수 있는 여러가지 현상들을 실험적으로 모사해보고 이를 분석하여 액체금속로 설계에 반영하여 왔다.

나트륨-콘크리트 반응 연구는 주로 액체 금속로 개발의 선진국인 미국, 영국, 프랑스, 독일, 일본 등에서 80년대 중반까지 활발히 추진되어 왔고 현재에도 프랑스, 독일, 일본등에서 수행되고 있지만 지금까지의 국내 연구는 전무하였다. 나트륨-콘크리트 반응은 매우 복잡적으로 일어나기 때문에 이의 해석에 어려움이 있어 이를 명확히 규명하여 액체금속로의 설계나 안전성 평가에 반영하기 위하여 액체금속로를 추진하고 있는 국

가에서는 현재도 보다 완벽한 나트륨-콘크리트 반응 모델의 개발목적으로 대규모 시험시설을 건설운전하여 용융나트륨의 누설에 따른 여러 형태의 사고 결과를 모사하기 위한 대규모 시험시설을 건설운전하여 연구를 계속적으로 추진중에 있다. 따라서 본 연구에서는 차세대 에너지원이 되는 액체금속로의 안전성 대책 확보의 일환으로 액체 금속로 개발 선진국들의 나트륨-콘크리트 반응연구 현황을 조사분석하였고 지금까지 수행되어진 나트륨-콘크리트 반응 특성과 이의 모델을 조사하였다.

2. 나트륨 및 콘크리트의 특성

나트륨과 콘크리트의 상호 반응 현상을 규명하기 위해선 나트륨 및 콘크리트의 특성을 이해하여야한다. 이 장에서는 이들 물질의 물리화학적 특성을 간략히 조사하였다.

2.1. 나트륨의 특성

기존의 원자력 발전소에서 냉각재로 가장 많이 사용되고 있는 물은 부식문제를 야기시키고 비점이 낮아 고압 (150기압)하에서 이용되고 있다. He등을 사용하는 가스 냉각재는 높은 압력하에서 운전되어야 하고 동력비가 높다. 이들 냉각재에 비하여 액체나트륨은 우수한 핵적특성과 양호한 열전도성 때문에 현재 액체금속로의 냉각재로 채택되어 이용되고 있다. 그러나 액체나트륨은 반응성이 매우 커서 이 물질이 누설되어 콘크리트와 반응하는 경우 심각한 안전성 문제를 야기시킬 수 있다.

나트륨은 상온에서 은회색의 고체로서 공기와 접하면 다색으로 변화한다. 상압에서 나트륨의 융점은 97.8°C 이고 비등점은 883°C 이다. 그리고 액체금속로의 나트륨 냉각재의 운전온도범위는 $400\sim 550^{\circ}\text{C}$ 이다. 나트륨은 화학적 활성이 크다. 특히 고온의 용융나트륨은 반응성이 매우 커서 공기, 산소 및 물 등과 급격히 반응하여 열을 발생하고 매우 환원성이 크며 부식성도 강하다. 특히 물 또는 수증기와 반응할 경우 수소가 생성되는데 이 반응에 의하여 발생된 반응열 때문에 주위에 산소가 존재할 경우 산소와 폭발적인 산화반응을 일으켜 물을 생성시킨다. 이러한 폭발 반응이 발생하면 미 반응된 나트륨이 사방으로 분산되는 위험이 수반되는데 이를 방지하

기 위하여 나트륨은 물 또는 수증기와 접촉 가능성을 배제할 수 있도록 나트륨 관련시설을 안전 설계할 필요가 있다. 본 연구에서는 고온의 용융나트륨이 콘크리트 위에 누설될 경우 콘크리트가 함유하고 있는 수분과의 화학반응에 관한 연구를 주 내용으로 한 것이다.

2.2. 콘크리트의 특성

2.2.1. 원자력 발전소의 콘크리트 구조물

원자력 발전소는 방사성 물질이 생성되고 특히 액체 금속로 발전소인 경우 반응성이 매우 큰 용융 나트륨을 냉각재로 사용하기 때문에 건설시에 여러가지 특수성을 고려하여 설계하고 공사할 필요가 있다.

원자력 발전소의 주요 구조물로서는 원자로 압력용기, 냉각재 펌프, 증기 발생기 등 주요기기가 설치되어 있는 원자로 건물 및 보조건물과 원자로 건물을 에워싼 차폐 벽으로 이루어져 있다. 이들 구조물을 다시 구분하면 원자력 발전소의 고유의 안전성 확보 목적으로 방사성 물질의 누설에 대비한 기밀성이나 차폐성(Shielding)을 필요로 하는 차폐성 구조물과 그렇지 않은 일반 구조물로 나눌 수 있다.

2.2.2. 콘크리트 재료

콘크리트는 사용하는 결합제의 종류에 따라 유기질 콘크리트와 무기질 콘크리트로 분류하거나 사용하는 골재의 종류에 따라 Basalt 콘크리트, Magnetite 콘크리트, Limestone 콘크리트 등으로 구분하기도 한다. 원자력 발전소에서 이용되는 콘크리트는 결합제가 무기질인 시멘트로 만들어진 콘크리트로서 이를 사용하는 골재의 종류에 따라 용융 나트륨과의 반응열 및 반응 진행정도가 다르다. 전세계 각국에서 진행하는 나트륨-콘크리트 반응 연구는 콘크리트를 사용하는 골재의 종류에 따라 콘크리트를 구분하여 연구를 수행시켰다. 액체금속로에 많이 이용되고 있거나 나트륨-콘크리트 실험에 이용된 콘크리트 종류는 표 1과 같다. 그리고 영국의 PFR 원자로에 사용된 콘크리트의 혼합전 구성성분을 표 2에 보여주고 있다[3]. 표 2에서 보는 바와 같이 콘크리트는 시멘트, 모래, 골재, 물로 구성되어 있고 이에 때로 혼화재료를 첨가하기도 한다.

표 1. 콘크리트 종류 및 이용

콘크리트 형태	주성분	이용 원자로 또는 실험장소	비고	참고문헌
Basalt	사장석(SiO_2)	美, FFTF ¹⁾	일반 콘크리트	1
Magnetite	자철광(Fe_3O_4)	美, HEDL ²⁾	-	2
Limestone	석회암(CaCO_3)	美, CRBR ³⁾	-	2
Granite	화강암	英, PFR ⁴⁾	일반 콘크리트	3
Iron-Serpentine	Fe-사문석	獨, FAUNA	차폐 콘크리트	4
Graywacke	경사암(SiO_2)	日, OARAI	-	5

1) Fast Flux Test Facility

2) Hanford Engineering Development Laboratory

3) Clinch River Breeder Reactor

4) Prototype Fast Reactor

표 2. 영국 PFR 콘크리트 혼합사양

구성성분	무게(kg)	무게(%)
포틀랜드 시멘트	127	15.6
모래(0.065-2.0mm)	254	31.2
19mm aggregate(9.5-19mm)	382	47.0
물	50	6.2

3. 나트륨과 콘크리트의 상호 반응

나트륨-콘크리트 반응은 여러 현상이 복합적으로 일어나기 때문에 이론적 해석이 어려우나 이의 완벽한 Mechanism을 규명하기 위하여 액체금속로 선진국에서는 콘크리트의 열효과 및 나트륨-콘크리트 반응실험을 행하고 실험결과를 이용하여 반응모델을 Computer Program을 써서 개발중이거나 개발된 Program의 개선 연구를 수행하고 있다.

그러나 고온의 나트륨이 콘크리트에 누설되어 발생하는 나트륨-콘크리트 반응은 열전달과 물질전달이 동시에 일어나고 여러 화학반응이 연속적으로 일어나기 때문에 완전한 모델을 세우는데 어려움이 있어 지금까지 여러 반응 메카니즘은 제시되었지만 완전한 모델은 아직까지 개발되어 있지 않은 실정이다. 이장에서는 나트륨-콘크리트 반응의 반응물이 되는 콘크리트의 고온 나트륨에 의한 가열시의 수분변화, 그리고 나트륨-콘크리트 화학반응과 이에 따른 콘크리트 구조변화 및 침식속도, 수소발생 등에 대하여 조사 분석하였다.

3.1. 콘크리트 가열시의 수분 변화

고온의 나트륨이 콘크리트와 접촉이 일어날 경우 이

로 인하여 콘크리트가 가열되어 콘크리트 중에 함유된 수분성분이 증발되고 이 증발된 수분과 나트륨의 반응이 일어난다. 따라서 콘크리트중에 함유된 물성분은 나트륨-콘크리트 반응의 주요 반응 변수가 된다. 콘크리트중에 함유되어 있는 물성분은 쉽게 증발할 수 있는 자유수(Free water)와 화학적으로 콘크리트 무기성분과 결합된 결합수(Compound water)로 구분된다. 이 자유수는 콘크리트 전 물성분의 약 50%를 차지하며 100°C이상으로 가열하면 콘크리트중에서 쉽게 빠른 속도로 방출된다. 이에 비하여 화학적 결합수는 200°C 이상 콘크리트를 가열시켜야 방출이 시작되고 넓은 온도 범위(200~800°C)에 걸쳐서 지속적으로 방출된다. 콘크리트중의 자유수와 결합수 모두 가열에 따른 압력 작용으로 방출된다 (Pressure-driven flow or Darcian flow). 그리고 전형적인 Basalt concrete인 경우 453Kg의 콘크리트 시편 중 콘크리트 혼합시 60Kg의 물이 주입되어 대부분 시멘트에 함유되어지고 큰 골재(자갈)에 1.8Kg 작은 골재(모래)에 7.26Kg의 수분이 본래 함유하고 있는 것으로 조사되었다[6]. 콘크리트 중의 수분성분 방출 속도는 나트륨과 콘크리트 경계면의 온도, 나트륨-콘크리트 반응의 진행속도, 그리고 접촉시간에 따라 결정된다. 그리고 일반적으로 열전달 속도는 화학반응 진행속도보다 훨씬 빨라 초기에는 나트륨-콘크리트 경계면 하부의 콘크리트중의 수분 증발을 촉진시키지만 이로 인하여 열전달 저항이 생겨 점점 수분 증발속도를 감소시킨다. 일반적으로 100-200°C 사이에 콘크리트 전체 수분 중의 약 70%가, 그리고 200-900°C 사이에 나머지 수분이 방출되는 것으로 밝혀졌다.

3.2. 나트륨-콘크리트 화학 반응

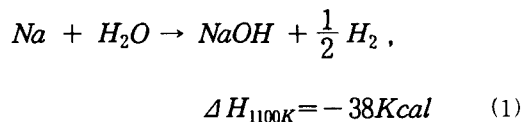
콘크리트-나트륨 화학반응은 다음과 같이 3단계로 이루어지는 것으로 밝혀졌다.

1단계 : 콘크리트내에서 증발된 수분과 나트륨과의 반응

2단계 : 1단계에서 생성된 NaOH와 콘크리트 고체 성분과의 반응

3단계 : 나트륨과 콘크리트 고체 성분과의 반응

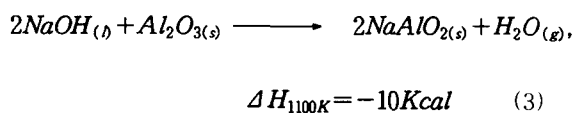
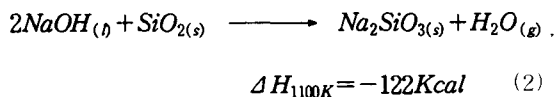
콘크리트 표면에서 증발된 수증기는 나트륨과 많은 열을 발생시키면서 급격한 반응이 먼저 이루어지며 여기에서 발생된 NaOH는 콘크리트 고체 성분인 SiO_2 , Al_2O_3 , CaCO_3 , MgCO_3 , Fe_2O_3 등과 서서히 부가반응을 일으킨다. 이때 발생한 반응열이 콘크리트 내부온도를 증가시키고 나트륨과 콘크리트 고체성분과의 화학반응을 일으킨다. 고온의 나트륨이 콘크리트 표면에 접촉한 후 처음에는 콘크리트 수분중에 자유수(Free water)가 증발되고 콘크리트 온도가 200°C 이상으로 상승될 때 콘크리트와 화학적으로 결합된 물분자가 온도 상승으로 기공도(porosity)가 커진 기포(pore)사이로 방출된다. 이렇게 방출된 수분은 콘크리트 표면에서 다음과 같은 반응에 의하여 NaOH가 생성된다.



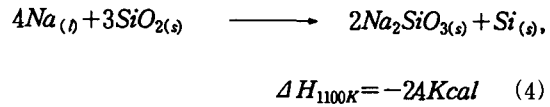
(1)의 반응속도는 콘크리트 중에 함유된 수분의 방출 속도에 좌우되며 이것은 콘크리트의 온도 증가에 따라 빨라진다. 또한 (1)의 반응에서 발생된 NaOH는 용융점이 낮으며(318°C) 콘크리트 종류에 따라 아래와 같은 여러 반응을 일으켜 다양한 부산물을 생성시킨다.

Basalt Concrete

Basalt Concrete의 주요 반응은 다음과 같다.

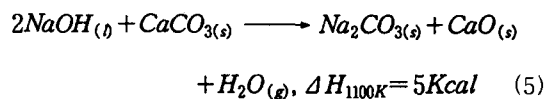


Basalt Concrete인 경우 SiO_2 가 주성분이므로 (2)의 반응이 주반응인 것으로 알려졌다. 그리고 나트륨은 약 450°C 온도에서 다음과 같이 SiO_2 와 직접 발열 반응을 일으킬 수 있다.

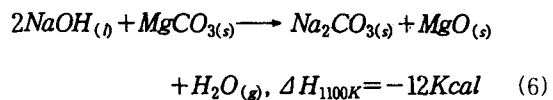


Limestone Concrete

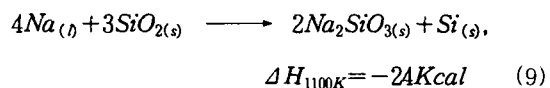
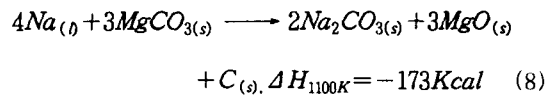
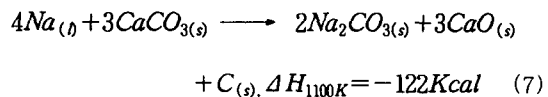
Limestone Concrete는 주로 Calcite(CaCO_3)와 Dolomite($\text{MgCa}(\text{CO}_3)_2 = \text{MgCO}_3 + \text{CaCO}_3$)로 이루어져 있고 주요성분은 CaCO_3 와 MgCO_3 로 아래와 같은 반응을 이룬다.



위의 반응에서 처음에는 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 가 생성되고 이것이 580°C 부근에서 $\text{CaO}(s)$ 와 $\text{H}_2\text{O}(g)$ 로 분해가 일어난다.

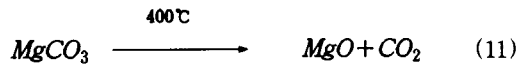
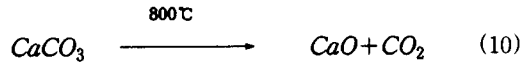


그리고 나트륨은 Limestone Concrete의 고체 성분과 약 580°C 에서 다음과 같이 직접 반응을 일으킬 수 있다.

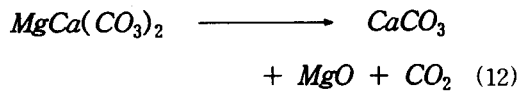


나트륨과 콘크리트와의 직접반응은 발열반응으로서 NaOH와 콘크리트 반응보다 빠르고, 완전 반응(Complete Reaction)에 가깝다. 그리고 NaOH의 생성량은 이의 콘크리트와의 반응에 따른 소비량보다 많아 여분의 NaOH가 액상형태로 반응생성물층을 형성하게 된다. 콘크리트 성분중의 CaCO_3 는 약 890°C 에서 MgCO_3 는 $400 \sim 540^\circ\text{C}$ 에서 아래 반응과 같이 흡열반응으로 열

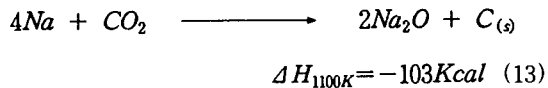
분해된다.



그리고 Dolomite는 약 700~775°C에서 두단계로 열분해된다. 첫단계 반응은 다음과 같다.

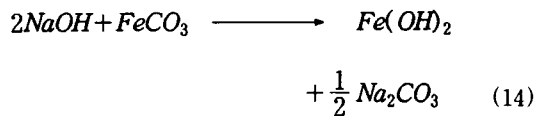


두번째 단계 반응은 (10)의 반응과 같이 진행되며 750°C에서 최대 분해 속도를 갖는다. 그리고 (10)~(12)반응에서 발생된 CO₂는 나트륨과 (13)의 식과 같이 반응할 수 있다.



Magnetite Concrete

나트륨과 콘크리트의 수분과의 반응에 의하여 발생된 NaOH는 Magnetite Concrete의 FeCO₃ 성분과 아래와 같이 반응한다. 그러나 이 콘크리트 속의 FeCO₃양은 조금 밖에 존재하지 않는다.



Magnetite의 주요 성분은 Fe₂O₃와 FeO로 나트륨과 다음과 같이 반응한다. 이때의 반응은 약 425°C에서 시작된다.

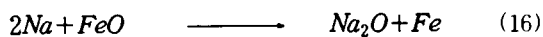
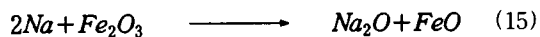


표 3에 Basalt, Limestone, Magnetite Concrete의 주요성분, 고온의 나트륨과의 주요 반응생성물 및 반응 시작온도(Threshold Temperature)를 보여 주고 있다.

초기의 콘크리트와 나트륨의 반응생성물은 수소가스와 NaOH이다. 수소가스는 Na Pool을 통해서 방울방울 배출되고(Bubbling) NaOH는 콘크리트를 일부 부

표 3. 나트륨과 콘크리트와의 반응생성물 및 반응 시작 온도 [12]

콘크리트 형태	주요 구성 성분	Na와 주요 반응생성물	반응 시작온도
Basalt	SiO ₂ CaO, SiO ₂	Na ₂ SiO ₃ Na ₄ SiO ₄ Na ₂ CaSiO ₄ NaOH	540±50°C
Limestone	CaCO ₃ CaMg(CO ₃) ₂	CaO NaOH Na ₂ O Na ₂ CO ₃ MgO C	570±15°C
Magnetite	Fe ₃ O ₄	NaOH Na ₂ O α-Fe	470±15°C

식시키지만 반응생성물로 Na₂SiO₃, CaO, MgO, Na₂O와 함께 Na Pool 하부인 콘크리트와의 경계층에 존재하여 나트륨과 콘크리트의 반응 및 나트륨에 의한 콘크리트 침식 속도를 감소시킨다.

3.3. 콘크리트의 구조변화 및 침식속도

나트륨-콘크리트 반응에 따라 콘크리트는 파쇄(Spallation), 압축분쇄(Compression Crushing) 그리고 장력파손(Tensile Failure)등을 초래할 수 있다. 콘크리트의 파쇄는 고온의 구배(High-temperature Gradient)에 노출된 부분에서 발생한다. 압축분쇄는 최고의 온도분포지역에 발생하는데 이것은 콘크리트가 벽이나 하부 콘크리트에 의하여 팽창제한에(Restrain)을 받기 때문이다. 장력파손은 곧 콘크리트의 갈라짐(Crack)을 일으키는데 이것은 가열된 콘크리트의 세공압력(Pore Pressure)과 온도구배 때문에 발생된다. 이에 비하여 제한받지 않은 콘크리트(Unrestrained Concrete)인 경우는 콘크리트의 파쇄나 압축분쇄 현상이 관찰되지 않는다. Na에 의한 콘크리트의 침투는 느리고 침식성 있는 Na-콘크리트 반응에 의하여 발생이 된다. 이 반응 침투속도는 초기에 속도가 빠르지만 시간이 지남에 따라 반응생성물 층이 두꺼워지고 수분 방출속도가 감소됨에 따라 감소되며 아래식으로 표현할 수가 있다. [12]

$$x = a(1 - e^{-bt}) \quad (17)$$

여기서, x = 반응 침투 깊이

(Penetration depth), cm

a, b = 상수 (Limestone인 경우
 $a=12\text{cm}, b=0.30/\text{hr}$)

t = 시간, hr

Limestone 콘크리트의 경우, 반응 침투속도는 처음 20min 동안 매우 빠르고 다음 3시간까지 처음의 약 1/9의 속도로 감소하다가 그후는 침투속도가 0에 가까워지는 것으로 밝혀졌다.

3.4. 수소 발생

나트륨-콘크리트 반응에서 발생하는 수소는 가열된 콘크리트에서 방출되는 수분양의 척도가 된다. 낮은 Na Pool 온도에서 생성된 수소는 Na Pool을 통과하면서 NaH를 형성시켜 Na Pool위에 수소를 발생시키지 않을 수 있다. 그러나 NaH의 분해온도인 500°C 이상에서 콘크리트에서 방출된 대부분의 수분은 수소를 생성시키는 것으로 관찰되었다. 그러므로 수소 발생속도는 콘크리트에서 방출되는 수분양을 말해주는 것이다. 대부분의 실험에서 수소 발생속도는 초기에는 적지만 곧 단시간에 급속히 증가하다가 수분의 방출속도가 줄어들 때 따라 감소된다. 그러나 콘크리트가 금이 가거나 파쇄될 경우 콘크리트 표면적, 수분의 방출통로, 그리고 미반응된 콘크리트로의 열전달 속도 등의 증가로 순간적으로 수소 또는 수분량이 증가할 수 있다.

4. 나트륨-콘크리트 반응모델

앞에서 설명한 바와 같이 나트륨이 콘크리트에 누출되었을 때 다음과 같은 과정이 연속적으로 일어난다고 할 수 있으며 이를 그림 1에 도시하여 보았다.

- 1) 고온의 나트륨에 의해 콘크리트가 가열되어 H_2O 와 CO_2 gas가 발생한다.
- 2) 생성된 H_2O gas가 콘크리트 기공사이로 상승하여 나트륨과 반응하여 수소와 NaOH를 생성시키고 화학반응열을 발생시킨다.
- 3) 나트륨과 NaOH가 콘크리트 고체성분과 반응하여 새로운 고체 생성물이 형성되고 미반응 NaOH는 콘

크리트 표면위에 액상 slurry층을 이룬다.

- 4) 발생한 기체가 bubble을 형성하면서 액상층 안에서 상승하여 나트륨을 액상층 아래로 이동시켜 콘크리트 표면에 도달하도록 한다.

나트륨-콘크리트반응 현상들을 정량적으로 예측하고 이해하기 위하여 여러 Computer model들을 개발하는 연구가 진행중인데 대표적인 code들을 표 4에 요약하여 보았다

표 4에서 보는 바와 같이 프랑스의 NABE Code는 대량의 나트륨 누설시 원자로 용기의 안전성을 진단하는 목적으로 개발되었고 원자로 용기 내에서 나트륨 누설에 따른 악화된 나트륨-콘크리트 반응 뿐만 아니라 콘크리트의 열분해, 그리고 나트륨의 연소도 고려한 모델이다. 이 Code는 콘크리트의 열전달이 균일하고 수분 함량이 균일한 물질로 가정하였고 콘크리트에서의 수분 발생량을 지수 법칙에 따라 감소하는 것으로 가정하였다. 그리고 이밖에 프랑스는 콘크리트중에서 온도증가에 따라 방출되는 수증기 및 탄소가스 양을 예측하는

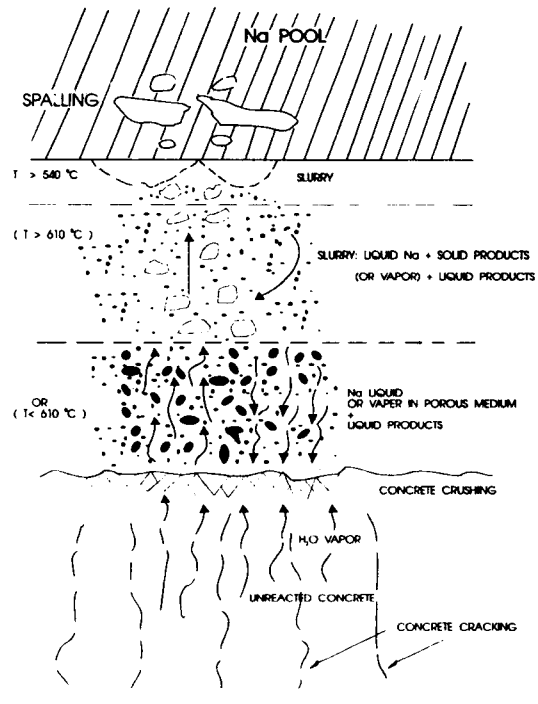


Fig. 1. General Description of the Sodium-Concrete Reaction Problem

표 4. 각국의 나트륨-콘크리트 반응 코드 비교

코드명	개발회사/연구소	주요 모델 특징	참고문헌
NABE	프랑스 CEA	<ul style="list-style-type: none"> • Limestone concrete와의 반응 • 수소 누적 발생량/콘크리트침식율 예측 	7, 8
CACECO	미국 HEDL	<ul style="list-style-type: none"> • 용기내의 온도, 압력 변화 및 수분 방출량/수소 방출량 예측 • 나트륨에 의한 콘크리트에의 Chemical attack algorithm 사용 	9, 10
SCAM	미국 SNL	<ul style="list-style-type: none"> • Basalt concrete와의 반응 모델 • 수소 발생량 예측 • 반응 시작후 2시간까지 실험치와 비교 	11, 12
SOCON-1	미국 HEDL	<ul style="list-style-type: none"> • Limestone concrete 와의 반응 모델 • 수소 발생량/에너지 발생량 예측 • SCAM code에 비해 오차가 적음 • WATRE Computer model에 의 하여 가열 콘크리트에서 방출되는 수분양 예측 	12, 13

SORBET Code 그리고 나트륨-콘크리트 반응, 나트륨 산화 및 수소연소 반응 뿐만 아니라 Na 에어로졸 거동 상태를 고려한 PYROS Code를 개발중에 있다 [14].

미국 Hanford Engineering Laboratories(HEDL)에서 일찌기 개발된 CACECO Code는 나트륨이 원자로 용기내에 누출시 용융나트륨의 콘크리트와의 반응에 따른 용기온도, 압력 그리고 수소발생량을 예측되도록 개발되었지만 입력 변수 변화에 따라 큰 오차가 발생되는 단점이 있다. 또한 HEDL은 나트륨-콘크리트 반응 모델로 SOCON-1 Code를 개발하였다. 이 모델은 나트륨과 콘크리트 생성물인 NaOH와 콘크리트와의 반응을 고려하였지만 콘크리트의 파쇄, 압축 분쇄 및 갈라짐 등을 고려하지 않았다. 미국의 Sandia National Laboratories(SNL)은 표 4에서 보는바와 같은 용융 나트륨과 Basalt concrete와의 반응모델인 SCAM Code, 그리고 Limestone Concrete와의 반응모델인 SLAM Code를 개발하였다. 최근에는 미국, 영국, 독일, 일본을 중심으로 SNL에서 경수로와 액체금속로의 안전성 분석을 위해 개발된 CONTAIN Code를 본격적으로 연구하는 LMR 안전사고 해석을 위한 공동연구 그룹을 만

들어 종종 CONTAIN-LMR User's Meeting을 개최하는 등 국제적으로 상호 협조하에 진행하고 있다. CONTAIN-LMR Code의 나트륨-콘크리트 반응에 관한 미국의 SNL과 일본 PNC의 공동연구 결과 SNL의 나트륨-콘크리트 반응에 관한 SLAM Code를 CONTAIN-LMR Code와 결합시킨 CONTAIN-LMR/1 Code를 발표하였다[15].

5. 각국의 반응연구 현황

원자로의 인허가 과정은 정상운전 상태를 벗어난 극단적인 사고(severe accidents)도 고려되는 안전설계를 요구하고 있으므로 액체금속로의 안전해석에 있어서 나트륨-콘크리트 반응은 매우 중요하다. 액체금속로에서 나트륨-콘크리트 반응과 같은 심각한 사고 가능성은 극히 적지만 설령 그런 사고가 발생한다 하더라도 이의 충격이 충분히 최소가 되도록 완회시키는 고유의 특성(inherent features)을 갖도록 안전설계가 이루어져야 할 것이다. 따라서 액체금속로의 개발을 추진하였거나 추진중인 국가에서는 액체금속로의 보다 높은 안전성 확보를 위하여 나트륨-콘크리트 반응을 수행하여 왔고 현재도 수행중에 있다. 표 5는 그동안 액체금속로를 추진하였거나 추진중인 국가에서 수행한 나트륨-콘크리트 반응 연구현황을 요약한 것이다.

표 5에서 보듯이 1940년 초부터 액체금속로를 추진해 왔던 미국에서는 Westinghouse Electric Corporation의 Hanford Engineering Development Laboratory(HEDL) [6, 12, 16-19, 21-25]와, Sandia National Laboratory(SNL) [1, 3, 4, 13, 20, 26-33]에서 70년대 초반부터 80년대 중반까지 많은 연구를 수행하였다. HEDL에서는 Basalt, Magnetite, Limestone 콘크리트와 용융 Na반응 실험을 소형, 중형, 대형 시험시설을 건설 운전하여 콘크리트 시편 및 Na 저장조의 Na 온도 변화, 가스(H_2 , O_2 , N_2) 농도, 용융 나트륨의 콘크리트 침투 깊이 및 반응에 따른 콘크리트의 조성변화를 실험을 통하여 측정하였다. SNL에서도 Crinch River Breeder Reactor(CRBR)에 사용된 Basalt concrete를 사용하여 대형 나트륨-콘크리트 반응 실험을 수행하였는데 용융 Na의 콘크리트 침투속도를 ultrasonic transducer를 개발 사용하였고 나트륨과 콘크리트 반응에서 NaOH의 효과도 조사하였다. 이 밖에 Argonne National Laboratory(ANL) [7, 35],

표 5. 각국의 Na-원자로 반응 실험현황

회사/연구소명 (국가)	시험용기 크기 /O ₂ 유지농도	원자로의 종류	Na/원자로 접촉형태	원자로의 표면적/두께	Na주입/유지 온도(°C)	Na 주입량 (Kg)	N ₂ Purge rate 및 기타 실험 조건	실험 목적 인자	참고 문헌
1. Westinghouse HEDL (미국)	• 2201 / 0.4~1.9%	• Basalt • Magnetite	• 직접 접촉	• 806cm ² /30.5cm (수평형) • 506.5cm ² /15cm (수직형)	• 160~430°C (주입 온도)	• 0.91 ~10.4	• 0.056~0.224m ³ /min • Na pool heater 사용	• 원자로의 시험 온도 • 가스(H ₂ O, N ₂) 농도 • 원자로의 시험 조성 • Na의 원자로 침투 깊이	16, 17
	14m ³ / 1%이하	• Basalt • Limestone	• 직접 접촉 • Detected liner 접촉	• 904cm ³ /30.5cm (수평형)	• 427°C /510~870°C	• 3.6 ~23	• 0.14 ³ /min • Na pool heater 사용	• 원자로의 시험 및 방열체 온도 • 수소 농도 • 시험 용기 압력 • Na의 원자로 침투 깊이	13
	• 14m ³ 107m ³	• Basalt • Limestone	• Faulted steel liner 접촉 두께: 1~1.6cm 구멍: 5~15cm	• 0.09~0.84m ² /59cm (수평형)	• 593~871°C /871°C	• 23 ~453	• 원자로의 보호용 insulating material 사용 • Na pool heater	• 원자로의 시험 온도 • 수소 농도 • 원자로의 시험 조성	6
	• 107m ³	• Basalt	• 직접 접촉	• 0.84m ² /0.61m (수평형)	• 593°C (주입 온도)	• 454	• 0.067~0.113m ³ /min • 충전(No.8) 원자로 사용 • Na pool heater	• 원자로의 시험 온도 • 수소 농도 • 원자로의 시험 조성 Aerosol 농도	19
2. SNL (미국)	• 20m ³	• Basalt (CRBR 원자로 사양)	• 직접 접촉 • Steel liner 접촉	• 0.29~1.2m ² /0.18~0.51m (수평형)	• 420~695°C (주입 온도)	• 20~250	• 0.06m ³ /min • Na pool heater 및 Ultrasonic transducer 사용 • NaOH 영향 조사	• 원자로의 시험 온도 • 가스(H ₂ N ₂ O, CH ₄) 농도 • Na의 원자로 침투 속도	1, 20
3. DNPDE (영국)	• 24m ³ (2.4×2.74× 3.65m)	• Granite (PFR 원자로 사양)	• 직접 접촉	• 2m ² /30cm (10mm 철근 원자로) • 180cm ² /8cm(PFR 원자로의 시험)	• 510~550°C (주입 온도)	• Na pool : 5 ~25cm	• 42 ³ /min • Passive suppression tray 사용 시험	• 원자로의 시험 및 Na pool의 온도 • 수소 농도 • 원자로의 시험 성분	3
4. CEA at Cadache (프랑스)	• 22m ³	• Limestone	• 직접 접촉 • Defective linear 접촉	• 706cm ² /15~60cm (수평형) • 900cm ² (수직형)	• 200~850°C (주입 온도)	• Na pool depth : 28cm	• 16~40m ³ /min • 원자로의 시험 cold face: open & closed	• 수소 농도 • 원자로의 시험 온도 • Na의 원자로 침투 깊이	8, 14, 41
5. KfK (독일)	• 220m ³	• Construction • Shielding	• 직접 접촉	• 0.5m ² (수평형)	• 500°C	• 180~450		• 원자로의 시험 온도	4
6. PNC (일본)		• Graywacke	• 직접 접촉	• 323cm ² /30cm (수평형)	• 600°C (주입 및 유지 온도)	• 10	• Sodium pool의 cover gas 길이: 80.5cm • Cover gas 온도: 300°C로 유지 • Rupture disk 사용	• Aerosol sampling 및 농도 분석	48

General Electric Company [36, 37] 및 Burns & Roe Company [38]에서 고온에 의한 콘크리트의 열효과와 나트륨과의 반응모델, 그리고 나트륨 누설에 대비한 LMFBR 안전설계에 관한 연구를 수행하였다.

1950년 초부터 액체금속로 개발에 착수하여 실험로(DFR)를 거쳐 원형로(PFR, 270MWe)를 건설하여 20년 이상 액체금속로의 운전경험을 갖고 있는 영국은 액체금속로 기술개발과 함께 Dounreay Nuclear Power Development Establishment (DNPDE)에서 시험시설을 갖추고 PFR의 안전성 확보를 위하여 PFR에서 사용된 granite concrete를 사용하여 나트륨-콘크리트 반응연구를 수행하였다[39]. 또한 Barker등은 용융 나트륨과 콘크리트, 그리고 이를 구성하고 있는 각 성분과의 반응열 및 반응 생성물을 측정 분석하였다[40].

프랑스는 미국과 영국보다 뒤늦게 액체금속로 개발에 착수하였지만 실험로(Rapsodie), 원형로(Phenix)를 거쳐 현재 실증로인 Superphenix (1240 MWe, 1985년 입계)를 건설 운전하는 액체금속로 기술개발의 선두주자이다. 나트륨-콘크리트 반응연구는 액체금속로 기술개발과 더불어 시작되었고 보다 안전한 액체금속로 개발을 위하여 많은 연구가 계속되고 있다[8, 14, 41, 42]. 특히, Cadarache에 대형 Esmeralda시험 시설을 건설하여 limestone concrete를 사용한 나트륨-콘크리트 반응 실험을 수행하고 이의 실험 결과를 이용하여 나트륨-콘크리트 반응 결과를 예측하는 NABE 1 Code를 개발하였다.

독일은 실험로(KfK-II)를 건설운전하고 원형로 SNR 300을 건설운전을 목표로 액체금속로 개발을 추진하여 Kraftwerk Union(KWU)에 의한 콘크리트의 고온 효과 [43], Interatom의 콘크리트 구성성분과 방열재의 나트륨과의 양립성 [44, 45]에 관한 연구를 수행하였지만 SNR 300의 운전 취소로 현재 EFR 개발에 참여하여, 이의 안전성 향상을 목표로 나트륨-콘크리트 반응연구를 KfK를 중심으로 수행중에 있다[4].

일본은 60년대말 다른 액체금속로 개발국가에 비하여 뒤늦게 액체금속로 개발의 추진을 시작하였지만 현재 이 분야의 기술개발에 가장 힘을 쏟고 있는 국가이다. 액체금속로 실험로(JOYO)의 가동을 시작으로 현재 원형로(MONJU)의 건설운전과 관련하여 콘크리트의 고온에 따른 물성변화 [46, 47] 그리고 나트륨-콘크리트 반응의 실험을 진행중에 있고 특히 반응중에 발생하는

aerosol의 발생량에 대한 연구를 수행한 바 있고[48] 계속하여 나트륨-콘크리트 반응에 따른 원자로 용기 안전성에 대한 연구를 추진중에 있다[5, 13, 49].

6. 국내의 나트륨-콘크리트 반응 연구대책

액체금속로에서 나트륨의 누설에 따른 나트륨-콘크리트 반응의 가능성은 극히 적지만 액체금속로 건설시의 보다 완벽한 안전해석 및 안전설계 그리고 안전운전을 고려하여야 함으로 액체금속로 개발 선진국들은 일찍부터 이에 대한 연구를 추진하여 왔고 현재도 보다 실제에 가까운 완벽한 나트륨-콘크리트 반응모델 개발을 위하여 많은 실험을 행하고 실험치에 기초를 둔 모델 개선을 위하여 노력하고 있다. 또한 원자로의 안전은 각국의 공통문제이고 각국의 제한된 연구비와 한정된 연구인력으로는 효율적인 액체금속로의 안전해석 및 설계에 한계성을 드러내어 최근에는 각국이 공동으로 연구를 추진하는 경향이 있다.

이에 비하여 우리나라는 액체금속로 개발의 시작이 일천하고 나트륨-콘크리트 반응 연구가 초기단계에 있기 때문에 우선 이분야의 기술수준을 액체금속로 개발 선진국이 그동안 이룩해 놓은 기술 수준에 조속히 도달시키는 것이 급선무이고 병행하여 선진국들과의 공동연구를 추진시켜야 할 것이다. 그리고 나트륨-콘크리트 반응연구는 이에 관한 연구에 국한할 것이 아니라 나트륨-콘크리트 반응에 관한 어느 정도의 기술수준이 확보된 경우에는 나트륨 화재연구와 연계시켜 추진하는 것이 바람직하다. 이것은 실제 상황에서 나트륨 화재와 나트륨-콘크리트반응에 관한 어느정도의 기술수준이 확보된 경우에는 나트륨 화재연구와 연계시켜 추진하는 것이 바람직하다. 이것은 실제 상황에서 나트륨화재와 나트륨-콘크리트 반응 현상이 동시에 발생할 가능성이 높기 때문이다.

따라서 21세기 유망한 에너지원으로 기대되는 액체금속로 기술개발을 수행함에 있어서 냉각재 취급기술과 냉각제 안전대책기술은 액체금속로의 주요기반 기술이므로 나트륨-콘크리트 반응 연구는 나트륨 화재 연구, 나트륨-수증기 반응 연구와 더불어 반드시 국내에서 확보해야할 기술이고 충분히 국내 자체적으로 확보가 가능한 기술이므로 이에 대한 연구가 계속 되어야 할 것이다.

7. 결 론

콘크리트는 사용 골재의 종류에 따라 Basalt, Limestone, Magnetite 콘크리트로 구분되고 고온의 나트륨과 콘크리트의 반응은 이들 콘크리트의 종류에 따라 다르다. 액체금속로 선진국에서 지금까지 개발된 나트륨-콘크리트 반응 모델도 모든 콘크리트에 적용될 수 있는 것이 아니라 해당 국가에서 사용되는 특정 콘크리트에 이용 목적으로 개발되었다. 따라서 국내적으로 나트륨-콘크리트 반응 모델을 개발하기 위해선 국내 사용 골재를 분석하고 실제 반응실험을 통하여 반응모델 변수를 결정할 필요가 있다.

그리고 액체금속로의 안전성 연구에 관한 각국의 공동노력과 한정된 연구예산의 효율적인 활용 목적으로 액체금속로 개발 선진국인 미국, 영국, 서독, 일본이 주기적으로 공동세미나 개최 또는 상호 협조하에 공동 연구를 진행하고 있기때문에 우리나라도 액체금속로 안전 기술을 최소한 조속히 축적하여 이러한 국제 공동연구의 일원으로 참여하여야 할 것이다.

또한 현재는 주로 프랑스, 서독, 일본에서 주로 나트륨-콘크리트 반응에 따른 에어로졸 발생실험 및 이의 예측 연구가 진행되고 있는데 이는 나트륨-콘크리트 반응 모델을 보다 완벽하게 하기 위한 것으로 우리나라도 앞으로 이 분야의 연구가 있어야 할 것이다.

참고문헌

1. R.U. Acton et al., "Sodium Interaction with Concrete and Fire Brick" Fast Reactor Safety Meeting, pp. 2122~2133 (1979)
2. R. Hilliard, "Summary of HEDL Fire Tests", HEDL-SA-1669.
3. N.J.L. Gardener and J.M. Simpson, "Sodium-Concrete Tests for the PFR on Granite Concrete with and without Passive Fire Suppression", Liquid Metal Engineering and Technology, BNES London, pp. 279~285 (1984)
4. W. Cherdron, "Sodium-Concrete Reactions at FAUNA", Proceedings of the Fourth International Contain-LMR User's Meeting, France (June 15~16) (1992)
5. D. Miyake, "PNC Studies on CONTAIN-LMR", 4th International CONTAIN-LMR User's Meeting, France June (1992)
6. A.J. Mahncke et al., "Breeder Reactor Faulted Cavity Liner Feature Tests", Fast Reactor Safety Meeting (1979)
7. N. Soule, "Analysis of the Sodium Concrete Interactions with the NABE Code" IWG-FR/67 (1989)
8. J. Dufresne et al., "Sodium Concrete Interactions", Proceedings of the LMFBR Safety Topical Meeting, Lyon, France (July 19~23) (1982)
9. R.D. Peak, "User's Guide to CACECO Containment Analysis Code", HEDL-TME 79~22 (1979)
10. R.D. Peak et al., "FFTF Containment of Hypothetical Accidents", Fast Reactor Safety Meeting pp. 1241~1250 (1979)
11. S. Antilla and J.E. Smaardyk, "Experimental and Analytical Studies of Sodium Interactions with Various Concretes", Proceeding of the LMFBR Safety Meeting, ENS (1982)
12. L.D. Muhlestein and A.K. Postma, "Application of Sodium-Concrete Reaction Data on Breeder-Reactor Safety Analysis", Nuclear Safety 25(2), pp. 212~220 (1984)
13. D.H. Nguyen. et al., "Sodium-Concrete Reaction Model Development", Proceedings of the LMFBR Safety Meeting, ENS, pp. III-143 III-152 (1982)
14. C. Casselman et al., "Sodium-Concrete Reactions : Experiments and Code Development" Science and Technology of Fast Reactor Safety, BNES, London, pp. 569~572 (1986)
15. D.E. Carroll et al., "Liquid-Metal Reactor Applications of the Contain Code", Nuclear Technology 91, pp. 259~267 (1990)
16. J.A. Hassberger, R.K. Hilliard, and Muhlestein, "Sodium-Concrete Reaction Tests" HEDL-TME 74~36 (1974)
17. R.K. Hilliard and W.D. Boehmer, "Concrete Protection from Sodium Spills by Intention-

- ally Defected Liners", HEDL-TME 75~75 (1975)
18. J.A. Hassberger and L.D. Muhlestein, "Intermediate-Scale Sodium-Concrete Reaction Tests with Basalt and Limestone Concrete", HEDL-TME 79~55 (1981)
 19. M.W. McCormick et al., "Large-Scale Sodium-Basalt Concrete Reaction Test LSC-1", HEDL-TME 80~57 (1981)
 20. E. Randich, J.E. Smaarsyk and R.U. Acton, "Large-Scale Exploratory Tests of Sodium/Limestone Interactions", NUREG/CR-3000 (1983)
 21. R.K. Hilliard, "Sodium-Concrete Reactions, Liner Response, and Sodium Fire Extinguishment", HEDL-SA-983 (1975)
 22. J.A. Hassberger et al., "Reactions of Sodium with Various Concrete Reaction Tests" HEDL-SA-1118 (1976)
 23. J.A. Hassberger et al., "Intermediate-Scale Sodium-Concrete Reaction Tests" ANL-78-10 pp. 258~266 (1978)
 24. J.D. McCormick and A.K. Postma, "Experimental and Theoretical Studies on Water and Gas Release from Heated Concrete", pp. 205~213 (1978)
 25. R.P. Colburn et al., "Sodium-Concrete Reactions", HEDL-SA-1716 FP (1979)
 26. J.F. Muir, "Response of Concrete to High Heat Fluxes", Trans. Am. Nucl. Soc. 26, pp. 399~400 (1977)
 27. D.A. Powers, "Large-Scale Melt/Concrete Interaction Tests", *ibid*, pp. 400~401 (1977)
 28. R.A. Sallach et al., "Chemical Phenomenology of the Sodium/Limestone Concrete Interaction", *ibid*, pp. 522~523 (1977)
 29. R.A. Sallach et al., "Chemical Phenomenology of the Sodium/Limestone Concrete Interaction", *ibid*, pp. 522~523 (1977)
 30. R.A. Sallach et al., "Large Scale Sodium Interactions with Limestone Concrete" ANL-78-10, pp. 233~242 (1978)
 31. J.E. Smaardyk et al., "Large-Scale Sodium Interactions: Preliminary Test Results for Limestone Concrete", Trans. Am. Nucl. Soc. 26, p 528 (1977)
 32. R.L. Knight, "Thermal Behavior of Concrete", *ibid*, pp. 528~529 (1977)
 33. H.J. Sutherland, "Acoustic Measurement of the Penetration of a Molten Metallic Pool into Concrete", Nuclear Technology 46, pp. 350~355 (1979)
 34. T.C. Chawla and D.R. Pedersen, "A Review of Modeling Concepts for Sodium-Concrete Reactions and A Model for Liquid Sodium Transport to the Unreacted Concrete Surface", Nuclear Engineering and Design 88, pp. 85~91 (1985)
 35. L. Baker et al., "Interaction of LMFBR Core Debris with Concrete", Conf-761001 (1976)
 36. E.L. Gluekler and A. Dayan, "Concrete Failure Modes at Heated Temperatures", ANL-78-10, pp. 233~242 (1978)
 37. A. Dayan and E.L. Gluekler, "Heat and Mass Transfer behind a Heated Reactor Cell Liner" Trans. Am. Nucl. Soc. 26, pp. 401~402 (1977)
 38. R.E. Palm, "LMFBR Plant Design Features for Sodium Spill and Fire Protection", Proceedings of the LMFBR Safety meeting, ENS, pp. III-45~53 (1982)
 39. D.A. Powers, "Empirical Models for the Thermal Decomposition of Concrete", Trans. Am. Nucl. Soc., 26, p 400 (1977)
 40. M.G. Barker et al., "A Chemical Study of Sodium-Concrete Reaction", Proceedings of the LMFBR Safety Topical Meeting, Lyon (1982)
 41. C. Casselman, "Consequences of Interaction Between Sodium and Concrete", Nuclear Engineering and Design 68, pp. 207~212 (1981)
 42. M. Berlin et al., "Experimental Study of Sodium Fires on Concrete Based on the Sodium-Concrete Reaction and its Consequences: Study of the Behavior of Various Con-

- cretes Under Metallic Sheaths", SESR-R29 (1977)
43. M. Peehs and W. Dorr, "Physical Properties and Behaviour of Heated Basaltic Concrete" ANL-78-10, pp. 215~222 (1978)
44. J. Jung, A. Reck and R. Ziegler, "The Compatibility of Alumina Ceramics with Liquid Sodium", J. of Nuclear Materials 119, pp. 339~350 (1983)
45. J. Jung and H. Runge, "The Compatibility of Basalt and MgO with Liquid Sodium", Liquid Metal Engineering and Technology, BNES, London, pp. 316~320 (1984)
46. K. Hirano et al., "Physical Properties of Concrete Subjected to High Temperature for Monju"
47. K. Hirano et al., "Design Techniques for Concrete Structures to High Temperature in Monju"
48. S. Miyahara, K. Haga, and Y. Himeno, "Sodium, Aerosol Release Rate and Nonvolatile Fission Product Retention Factor During a Sodium-Concrete Reaction", Nuclear Technology 97, pp. 212~223 (1992)
49. Y. Himeno et al., "Engineering Scale Test on Sodium Leak and Fire Accident and its Consequences in Auxiliary Building Fast Breeder Reactors", The Fourth International Conference on Liquid Metal Engineering and Technology, pp. 202-1~10 Avignon, France (1988)