

事故時의 Source Term에 대한 規制 및 設計要件의 變化

Regulatory and Design Implications of Changes in Accident Source terms



Edward A. Warman

Senior Consulting Engineer

Stone & Webster Engineering Corporation

1. 概要 및 要約

本 論 文 은 原 子 力 發 電 所 의 심 한 爐 心 損 傷 사 고 시 에 발 생 하 여 발 전 소 내 에 존 재 하 거 나, 외 부 로 放 出 되 는 Source term (예 : 核 分 裂 生 成 物 의 방 출 시 기, 구 성, 양) 에 대 한 최 근 의 技 術 現 況 과 US NRC (U. S. Nuclear Regulatory Commission) 의 Source term 에 관 한 개 선 된 情 報 를 規 制 的 인 측 면 으 로 어 뎅 게 수 용 하 고 있 는 가 를 요 약 하 고 있 다.

規 制 와 設 計 要 件 의 체 계 적 인 평 가 를 위 해, 심 한 爐 心 損 傷 事 故 時 의 Source term 에 대 한 새 롭 고 개 선 된 지 식 의 견 지 에 비 추 어 어 뎅 게 규 제 및 설 계 요 건 이 변 화 되 어 야 적 합 한 가 를 결 정 하 기 위 한 방 법 이 제 안 되 었 다.

Source 에 관 한 技 術 現 況 의 요 약 에 는 최 근 에 발 간 된 수 많 은 報 告 書 특 히, OECD Nuclear Energy Agency 의 원 자 력 발 전 소 事 故 時 放 射 線 源 에 대 한 NEA 專 門 家 들 에 의 한 보 고 서 와 筆 者 자 신 의 중 요 Source term 의 調 查 研 究 에 대 한 다 소 간 의 지 식 과 관 련 된 상 황 을 반 영 하 고 있 다. 또 오 늘 날 의 공 정 치 못 한 연 구 진 전 에 대 해 강 조 되 는 데 이 는 MARK III 格 納 容 器 속 의 PWR 과 B - WR 에 많 은 비 중 을 두 어 왔 기 때 문 이 다. 이 것 은 일 시 적 인 현 상 이 며 앞 으 로 몇 개 월 안 에 BWR MARK I 및 II 發 電 所 設 計 에 대 해 서 도 상 당 한 진

척 이 있 을 것 으 로 기 대 된 다.

US NRC 의 개 선 된 Source term 정 보 의 규 제 적 용 을 위 한 프 로 그 램 은 최 근 에 발 간 된 기 록 들 로 부 터 요 약 되 었 고, 規 制 要 員 에 의 해 서 발 표 된 최 근 의 계 획 들 을 반 영 하 고 있 다. 本 稿 으 로 서 제 출 된 증 대 된 Source term 의 지 식 과 이 해 의 결 과 로 서 規 制 와 設 計 變 化 의 평 가 를 위 해 제 안 된 접 근 방 법 은 Source term 으 서 파 생 된 요 건 들 을 체 계 적 으 로 範 疇 化 시 키 고 그 리 고 적 절 한 變 化 可 能 성 을 평 가 하 는 것 이 다. 규 제 와 설 계 변 경 의 평 가 를 위 한 접 근 방 법 은 다 음 과 같 이 우리 들 의 지 식 에 있 어 서 근 본 적 인 변 화 를 야 기 시 켜 졌 다 는 사 실 로 연 결 된 다.

· 핵 분열 생성물의 爐 心, 冷 却 系 統, 格 納 容 器 로 부 터 의 放 出 時 期

· 物 理, 化 學 的 形 태 를 포 함 하 는 放 出 構 成 物

· 放 出 量 (예, 방 출 된 爐 心 內 容 物 (Core inventory) 의 파 편)

첫 두 범 주 는 初 期 Source term 에 대 한 조 건 으 로 부 터 의 본 질 적 인 質 的 變 化 의 영 역 을 포 함 한 다. 이 들 두 범 주 에 서 의 변 화 에 의 한 규 제 와 설 계 요 건 을 개 정 하 기 위 해 서 는 상 세 한 定 量 化 를 준 비 할 필 요 까 지 는 없 고 단 지 지 금 까 지 얻 은 정 보 를 기 초 로 진 행 하 면 된 다. 放 出 量 에 의 해 서

영향을 받는 규제 및 설계 요건의 개정(특히 大氣에 대한)은 다른 두 범주에서는 요구되지 않는 정도의 定量化를 필요로 한다. 그같은 정량화 작업은 대형 dry PWR과 MARK III BWR Reactant를 위해 착수하고 있으며, 뿐만아니라 MARK I 및 II BWR에도 빠른 속도로 적용하게 되어 가고 있다.

2. Source term에 대한 技術現況

WASH-1400이라고 불리는 Reactor Safety Study(RSS)가 수행될 때만 하더라도 심한 사고시 Source term의 갖가지 중요 상황에 대한 데이터와 정보는 소량에 지나지 않았다. 이런 상황에서 RSS 研究者들은 고려할만한 사고 추이에 대한 Source term을 정의하기 위해 많은 保守的인 假定들에 의존했다. 오늘날에는 그 당시에 알려지지 않았던 많은 것들이 알려졌고, 그 결과로서 Source term에 대한 기술은 크게 진보하였다. 그렇지만 이러한 진보는 실질적인 複雜性을 무시한 채 진행되었다.

1979년3월 TMI사고 이후 심한 事故時 Source term에 대한 지식과 이해를 증진시키기 위해서 국제적으로 아주 많은 노력이 행해졌다(수억달러의 財源을 포함). 이같은 노력은 부분적으로는 TMI사고가 다른 사고들과는 달리 주변환경에 방출될 것이라고 예측된 것과 실제 발생한 것과의 사이에 커다란 차이를 드러내었기 때문이다. 비록 TMI사고시 放出物은 본질적으로 原子爐冷却系統과 Quench tank 속 放出經路內에 존재했던 물의 영향을 많이 받았다고 알려졌지만, 流體系統으로부터 放出場所까지의 경로에 물이 없는 경우의 보다 심각한 사고시의 분석도 RSS에서 보고된 것보다는 사실상 더 낮은 Source term 결과를 가져왔다.

이러한 사실로 초창기의 가정들을 工學的인 研究結果로 대체시킬 수 있게 되었다.

그림 1은 최근 널리 알려진 Source term에 대

FIGURE 1-KEY SOURCE TERM REPORTS

- Battelle Columbus Study-BMI 2104 July 1984
- ANS Special Committee on Source Terms November 1984
- IDCOR Technical Summary Report November 1984
- American Physical Society Study Group March 1985
- U. S. NRC Reassessment-NUREG-0956(Draft) July 1985
- IDCOR Technical Report 85.4(5.3) Reassessment of Emergency Planning Requirements With Present Source Terms February 1986
- Nuclear Energy Agency-OECD Report by an NeA Group of Experts on Nuclear Reactor Accident Source Terms March 1986
- U. S. NRC Severe Accident Risk: Rebaselining/Risk Reduction(SARRP) NUREG-1150 In Preparation

한 報告書를 열거하고 있는데, 이것들은 광범위한 工學的研究를 근거로 해서 보고된 것이거나, Source term技術을 재검토한 것들이다. 이런 보고서들로부터 얻어진 결론은 Source term分析技術은 RSS에서 취급된 것보다 훨씬 복잡하고 현재로서는 모든 발전소 형태에 대한 Source term값을 一般化하는 것은 불가능하다는 것이다.

지금까지의 연구 진척 상황은 몇 종류의 발전소에 대해서는 많이 알려져 있으나 다른 종류의 발전소에 대해서는 그다지 알려져 있지 않아 균형적인 연구가 되어 있지 않다. 그럼에도 불구하고 Source term에 영향들을 미치는 現象들을 기본적으로 이해하는 데 Source term技術은 RSS技術보다 모든 종류의 발전소를 위해 광범위하게 개량되고 있다. 표 1은 5가지 Source term 예를 나타내고 있는데, 2개는 設計基準事故(Design Basis Accident)의 해석에 사용되고 3개는 더 심한 9등급 사고와 관계된다.

본질적으로 현재까지 발간된 Source term의 國際的 再評價를 위한 모든 노력은 더욱 심한 사고들을 다루어 왔으며 설계기준 사고의 Source term에 대한 잠재적인 변화 연구가 최근 고려되었다.

현재의 Source term分析은 대형 dry PWR, MARK III BWR, 소규모의 아이스콘덴서, PW-

Table 1-Examples of Source Terms

A. Design Basis Accident Source Terms(Used in Conjunction With Design Basis Containment Leak Rates and Engineered Safety Features mitigating effects)

Fraction of Core Inventory Released Into Containment		
	TID-14844	Reg. Guide 1.4
Xenon & Krypton Iodine	1.00 instantaneously released into Cont. 0.50 instantaneously released into Cont. 0.25 Plated out 0.25 available for release from Cont.	1.00 instantaneously released into Cont. 0.25 available for immediate release from Cont. Iodine Composition: 91% Elemental 4% Methyl or inorganic 5% Particulate
Solids(Other fission Products)	0.01 available for release from Cont.	

B. Severe Core Damage Accident Source Terms

Fraction of Core Inventory Released to Environment			
	RSS PWR-2 Rel. Category	BMI-2104 Surry TMLB'-δ	IDCOR Zion TMLB'-δ ℓ
Time of Release, hr	2, 5	2, 5	32
Xenon-Krypton	0.90	0.85	1.00
Iodine-Bromine	0.70	0.07	0.0017
Cesium-Rubidium	0.50	0.058	0.0017
Tellurium-Antimony	0.30	0.055	0.00002
Barium-Strontium	0.06	0.01	<0.00001
Ruthenium	0.00	0.0013	<0.00001
Lanthanum	0.002 2	0.00017	

R에 있어서 심각한 爐心損傷事故(Severe Core damage accidents)에 대한 Source term을 산출했다. 그것은

- 1) RSS의 放出範疇보다 훨씬 낮았고
- 2) 각 연구팀들과 격납용기 바이패스과정을 없앤다는데 합리적인 의견 일치를 보았으며,
- 3) 인접한 構成物들에서 보류되어 있는 核分裂生成物은 NRC補助로 발간된 분석에서보다 産業界補助의 분석에서 많았다. 이는 기술에서의 근본적인 차이때문이 아니라 현재까지 NRC補助의 분석에서 포함되어 있지 않은 많은 隔壁構造나 다른 물리적인 효과가 포함되어 있기 때문이다.

Source term技術은 RSS Source term을 새롭게 개선된 Source term으로 대체시켜 이런 종류의 발전소에 적용시킬 정도로 충분히 진보되

었다.

PWR과 MARK III BWR에 관해서는 “論亂의 範圍”가 상당히 줄게 되었다. 또한 最適評價 Source term은 현재 이용할 수 있는 자료에 근거해서 개발되었다. 格納容器的 바이패스 과정에 관해서 연구 결과는 과정들에 있어서 발전소 특유의 성질을 나타낸다. 현재 연구들은 RSS V過程處理에서 많이 진보했고, 발전소 특유의 細部項目들이 이런 과정에 대한 Source term에서 중요한 역할을 한다는 사실을 설명한다.

심한 爐心損傷事故는 格納容器內過程과 格納容器 바이패스 過程의 2가지 종류로 분류시킬 수 있다. 대형 dry PWR에 대하여는 격납용기 내 과정에 대한 Source term은 여러 연구에서 그 크기가 비교적 비슷하다. 이런 과정들은 TMLB 發電所停電, 大型破裂 LOCA, 小型破裂 LOCA

와 같은 과도 현상을 총망라하고 있다.

격납용기 바이패스과정에 대한 Source term 은 발전소 특유의 설계 특징이 우선 다르기 때문에 연구마다 약간의 차이는 있다. 大型 dry PWR과 MARK III BWR에 대한 Source term 문제에 근접하기 위하여 중요한 기술적 개발은 필요치 아니하다. 현재 진행중인 부가적인 연구가 다가오는 몇 개월 이내에 MARK I과 II BWR에 대한 같은 수준의 成熟度에 Source term技術을 이루게 할 것으로 기대된다.

3. US NRC 프로그램

그림 2 는 NUREG -0956(初案)에서 논의되었듯이 Source term연구와 규제에 대한 US NRC의 계획을 나타내고 있다. 연구가 NUREG -0956과 심각한 事故危險度의 기준 및 위험도의 재평가 축소계획 NUREG -1150을 근거로 완성되었기 때문에 規制變化에 새로운 변천을 계획하고 있다(그림2).

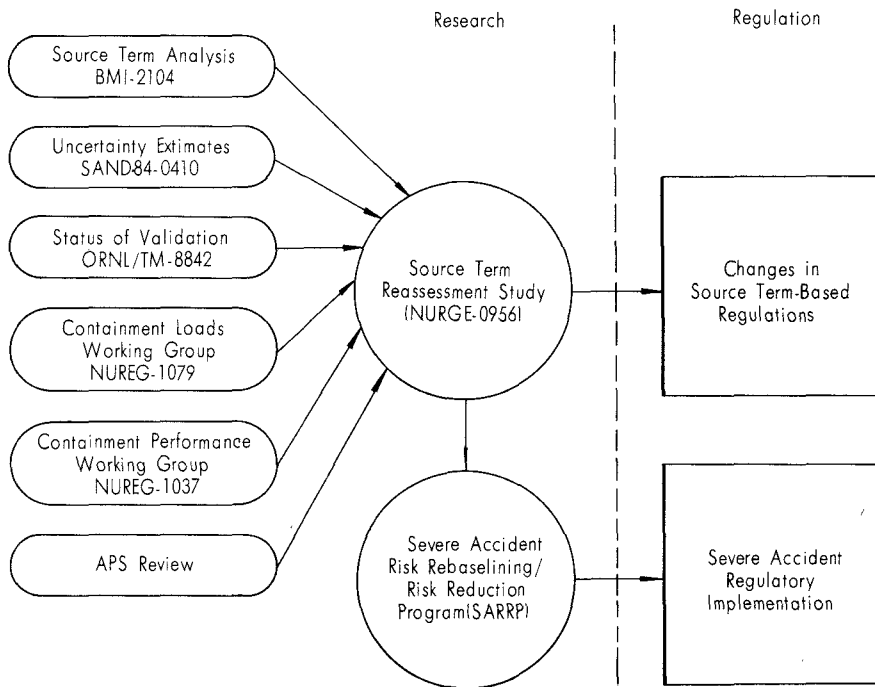
“심한 사고에 대한 政策의 실행 계획과 새로운

Source term에 대한 情報規制에의 이용-SECY - 86 - 76”이라고 이름붙여진 최근 문서에서 NRC委員이 개선된 Source term에 대한 정보 규제의 이용에 대해서 계획을 요약한 바 있다. 새로운 Source term 情報의 결과로 規定과 規制實行에서의 변화들은 短期·中期·長期의 변화로 나누어 그림 3 과 같이 요약하였다. NRC要員들의 구체적인 변화에 관계된 Source term에 대한

Figure3-USNRC Staff Identified Potential Source Term Related Changes

Short Term Changes	Intermediate Term Changes	Long Term Changes
1. Revised treatment of severe accidents in near-term Environmental Impact Statements 2. Removal of Spray additives in PWRs 3. Credit for fission product scrubbing in suppression pools(BWRs)	1. Emergency Planning 2. Containment Leak Rates 3. Control Room Habitability 4. Environmental Qualification of Equipment 5. Safety Issue Evaluation	1. Siting 2. Accident monitoring and management

Figure 2 Program Relationships



현재의 획기적인 예정 계획은 그림 4에 나타나 있다. 또한 AIF에서는 NRC와의 연계체제를 갖 추기 위하여 새로운 Source term정보의 規制適用에 관한 전문적인 실행 그룹을 특별히 설치했다(필자도 AIF 실행 그룹의 일원이다). 이 그룹은 여러 차례의 모임을 통해서 NRC 계획에 대한 業界의 반응과 정보 및 기술교환을 이루고 있다.

4. Source term에 의해 영향받는 規制와 設計要件

심한 사고의 Source term의 개선된 이해와 논리는 다음과 같이 연결된다.

- 1) 發電所와 爐心으로부터의 放出時期
- 2) 放出物의 構成
- 3) 放出量

本 論文에서는 Source term기술에서의 변화로 인해 영향을 받는 規制 및 設計要件은 그 설계요건이 위 세가지중 어디에서 유래하는가를 분

류해 그림 5에 나타내었다. 그림 5에는 Source term기술의 각 범주로부터 파생된 규제 및 설계요건의 예로 나타나 있다.

각각의 범주에 대한 간단한 검토를 다음에 하였다. 방출시기에 관해서는 TID - 14844와 US NRC 規制指針 1.3과 1.4에 나타난 바와 같이, 爐心으로부터의 방출은 즉각적이라는 가정에서 많은 규제 및 설계요건이 파생된다.

放出物의 構成에 관해서는 non-noble 가스 핵분열 생성물의 중요한 형태는 격납공기와 PWR

Figure5-Categorization of Regulatory and Design Requirements

Category	Examples
Requirements Derived From Timing of Release	Rapid(e.g., 5sec.) Closure of Containment Isolation Valves
Requirements Derived From Composition of Release	Caustic additive for containment spray systems Charcoal filtration systems
Requirements Derived From Magnitude of Release	Allowable containment leak rate Emergency Planning Siting

Figure4-Major Milestones in USNRC Schedule

1. Establish Capability for Source Term Calculation	
• Source Term Code Package operational at Battelle & Brookhaven	3/86
2. Selection of Regulatory Principal	
• Selection of regulatory Principle	4/86
• Forward Commission paper on selection	5/86
3. Development of New Forms of Source Terms	
• Calculate source terms for 6 reference plants	6/86
• Evaluate uncertainty of source term calculations	8/86
• Propose new forms of source terms	9/86
• Meet with industry and ACRS	10/86
• Development of new source terms	12/86
4. Source Term Related Changes	
• Prepare revisions to Standard Rev. Plans & Reg. Guides	5/86
• Issue revised Standard Rev. Plans & Reg. Guides for Comment	9/86
• Initiate work on intermediate changes	5/86
• Calculate source terms for 6 reference Plants	6/86
• Meet with industry and ACRS	7/86
• Prepare revisions to rules, reg. guides, and std. Rev. Plans	11/86
• Issue revised rules, reg. guides and Std. Rev. Plans for comment	2/87 to 6/87
• Initiate work on long-term changes	10/86
• Prepare revisions for rules, reg. guides, and Std. Rev. Plans	8/87
• Issue revised rules, reg. guides, and Std. Rev. Plans for comment	12/87

보조건물인 인접구조물에서 aerosol의 형태라고 의견이 모아지고 있다. Iodine의 중요 형태는 高水溶性鹽인 CsI의 형태로 알려져 있다. 規制指針 1.4에서는 Iodine의 初期構成은 91%가 原素形態, 4%가 메틸 혹은 無機物形態, 그리고 5%가 粒子形態라고 밝히고 있다. Iodine이 과거 유력하게 가정한 원소형태가 아니고 아주 대부분이 입자형태를 띠고 있다는 최근의 관찰 결과로 US NRC는 원소형태의 Iodine을 제거하기 위한 격납용기 분무기에의 附加物의 삭제를 “短期” 規制變化로 명시하였다. 이것은 Source term의 구성에 대한 새로운 지식과 이해에 의해서 영향받은 설계 및 규제 요건의 한가지 예에 지나지 않는다.

Source term의 방출량에 관해서 명백하게 영향받는 분야들은 발전소 위치, 非常計劃, PRA이다. 그 다음으로 허용 가능한 격납용기 漏出率과 部品條件을 예로 들 수 있다. 그러나 적은 부류의 부품이 더 현실적인 Source term으로부터 영향을 받고 있다.

爐心, 爐冷却系統 그리고 격납용기로부터의 放出時期, 構成, 放出量에 의해서 각 요건이 어떻게 영향을 받는가를 재평가해 봄으로써 規制와 設計條件의 완전한 재평가가 행해져야 한다고 제안되었다. 그러한 평가작업이 끝나면 요원들이 각 변화를 지지하는 필요한 정보를 근거로 하여 短期·中期·長期變化도 범주화 시켜야 된다.

放出時期와 방출물의 구성에 근거를 둘 수 있는 그런 변화에 대해서는 중요한 기술 개발이 필요치 아니하다.

방출물의 양에 근거를 둘 수 있는 변화에 대해서는 Source term技術 현황이 大型 dry PWR과 MARK III BWR에 필요한 변화를 시킬 수 있도록 충분히 진보되어 있다. MARK I과 II BWR에 대한 방출량 추정과 연관시켜 같은 수준의 기술에 이르기 위해 약간의 부가적인 연구가 필요하다. 격납용기 바이패스과정의 발전소 특유

의 성질이 알려졌고 방출량에 영향을 받는 規制變化에 관한 발전소 특유의 분석이 필요하다. 다시말해 방사선기술을 規制와 設計變更을 위해 이용하는 접근방법은 심한 사고시 Source term의 재평가에서의 많은 국제적인 노력의 결과로부터 얻는 체계적인 방법으로서 촉진된다.

우리가 새로운 標準化된 설계를 할 때, 그 설계는 即刻的인 放出과 假說的인 化學構成과 같은 재래의 가정에 근거해서는 안될 것이다. 요건들을 더욱 현실적으로 하기 위해서는 가설화된 非實際的인 조건으로부터 나오는 이상적인 안전에 대립하는 것으로서의 요건들을 실제 안전에 이바지하게 하여야 한다. 비록 Source term의 재평가에서 많은 노력이 환경에의 잠재적 방출량에 기울었지만, Source term의 방출시기와 구성을 정상적으로 이해하는 데 있어서 기본적인 변화로 발전소 설계와 규제에 대해서 현실적인 개선을 위한 중요한 전망을 가져다 준다.

References

1. SECY-86-76, "Implementation Plan for The Severe Accident Policy Statement and the Regulatory use of New Source Term Information." U.S. Nuclear Regulatory Commission, February 28, 1986.
2. "Nuclear Reactor Accident Source Terms," Report by an NEA Group of Experts, Nuclear Energy Agency, OECD, March 1986.
3. WASH 1400(NUREC-75/014) "Reactor Safety Study—An Assessment of Accident Risks in U.S. Commercial Nuclear Power Plants." U.S. Nuclear Regulatory Commission, October 1975.
4. BMI-2104, "Radionuclide Release Under Specific LWR Accident Conditions," Battelle Columbus Laboratories, July 1984.
5. Report of the American Nuclear Society Special Committee on Source Terms, September 1984.
6. IDCOR Technical Summary Report, "Nuclear Power Plant Response to Severe Accidents," Technology for Energy Corporation, November 1984.
7. Report to the American Physical Society of the Study Group on Radionuclide Release from Severe Accidents at Nuclear Power Plants. Reviews of Modern Physics Vol. 57, No.3, Part II, July 1985.