

Source Term 評價의 最近動向

輕水爐爐心損傷事故時의 Source Term評價¹⁾에 관해서 世界各國에서 많은 관심이 집중되고 있다. 이는 TMI-2事故를 계기로 爐心損傷事故時²⁾의 Source Term評價를 보다 현실적인 假定으로 하려는 美國原子力規制委員會의 움직임에 對應하는 것이라고 할 수 있다. 爐心損傷事故에 대한 各國의 思考方式은 各各다르며 Source Term에 관한 견해도 다르다. 그러나 종래의 Source Term評價가 상당히 보수적인 假定에 따른 것이라는 견해가 一致하고 있다.

다음은 美國에서의 Source Term再評價作業의 內容과 結果를 중심으로 Source Term의 최근 동향을 정리하여 Source Term評價에 관한 새로운 지식과 문제점 등을 紹介한 것이다.

지금까지의 Source Term 評價

事故時의 Source Term평가는 원자로 설치시에 주변으로의 영향을 평가할 필요성이 있음에서 시작되었다. 지금까지의 Source Term평가의 變遷을 보면 美國에서는 그림 1과 같다. 이 Source Term평가는 第1次 Source Term

註1 : 「Source Term」이란 여기서는 事故時에 爐心에서 1次系統, 格納容器를 거쳐 環境중으로 放出되는 核分裂生成物(FP, Fission Product)의 量으로 定義한다. 이때 化學形도 고려한다.

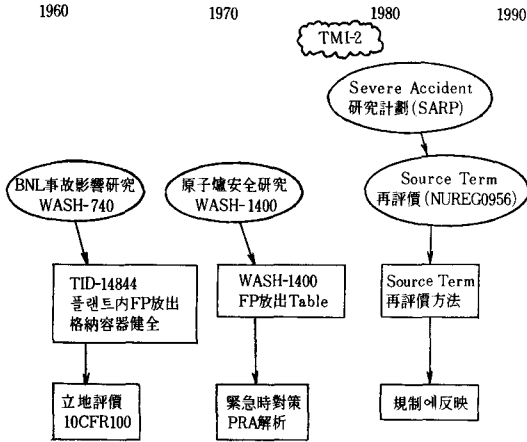
註2 : 「爐心損傷事故」란 核燃料棒이 破損되어 核燃料棒의 健全성을 유지할 수 없는 상태에 이르는 사고로 정의된다. TMI-2事故가 그 하나의 예이다.

評價(TID Source Term), 第2次 Source Term評價(WASH-1400), 第3次 Source Term評價(Source Term再評價)로 분류할 수 있다.

過去에 보고된 것으로 1950년에 발표된 WASH-3은 先驅的인 Source Term평가라고 할 수 있다. 이 보고서에서는 黑鉛減速 플루토늄生成原子爐의 설치에 관한 평가를 하여 최악의 경우에는 爐心の 主要부분이 용융되어 모든 FP가 環境으로 방출된다고 하고, 輕水爐의 평가에 대해서도 같은 가정을 하였다. 이 가정은 1956년에 발행된 WASH-740에도 채택되었으나, 방사성물질중에서 요오드가 가장 중요한 핵종임이 인식되었다. 특히, Windscale事故時에 2만 퀴리의 요오드가 방출됨으로서 單體요오드가 기체로 방출된다는 견해가 유력했다. 1960년에는 ACRS(原子爐安全防護諮問委員會)가 처음으로 Source Term이라는 용어를 사용해서 原子爐認許可를 위한 평가방법을 검토했다. 여기서는 外部建物 또는 格納容器中에 FP가 방출되는 임의의 사고를 想定해서 不活性가스는 100%, 할로겐은 50%, 非揮發性物質은 1%가 방출되는 것으로 했다. 그리고 이들 FP가 리크량의 설계치 또는 측정치에 따라서 環境으로 방출된다고 했다.

이 사고방식은 TID-14844에 받아들여져서 立地評價를 위한 規則10CFR PART100의 일부가 되어 1974년의 規制指針으로 지금도 계속되고

(그림 1) Source Term 評價의 經緯



있는 사고방식이다. 그러나 여기서도 요오드는 불활성가스와 마찬가지로 舉動하는 것으로 되어 있어 화학적인 고려는 하고 있지 않다.

한편 原子爐事故의 영향을 公衆이 받는 리스크의 관점에서 평가한 것이 1975년에 발표된 라무센報告(WASH-1400)이다. 이 보고서에서는 사고를 일으키는 要因을 定量的으로 평가하고, 事故發生確率을 구해 그때의 FP放出量을 계산했다. 이에 따르면 원자로의 리스크를 지배하는 사고는 發生確率이 낮으나 영향이 큰 사고로 爐心溶融, 格納容器破損 및 工學的安全施設不作動을 수반하는 사고로 하였다.

그렇지만 당시는 이와 같은 사고에 관한 定量的데이터가 없었기 때문에 FP의 物理化學的 舉動에 대해서 많은 保持效果가 무시되어 과도하게 보수적인 가정에 따라서 평가되었다고 할 수 있다. 이와 같은 것은 美國原子力學會가 TMI-2事故를 계기로 Source Term 재평가를 실시하게 된 動機의 하나이기도 하다.

이상과 같이 지금까지의 Source Term 평가에서는 임의의 방출량을 가정하거나 또는 보수적인 가정에 따라서 평가가 행해졌다. 그런데 TMI-2事故時 環境에 방출된 요오드의 방출량이 종래의 평가방법에 따라서 산출된 量에 비해 대폭 적어서 Source Term 평가방법을 재평가하기

로 했던 것이다.

Source Term의 再評價

1. 背景

TMI-2事故에서 環境으로 방출된 요오드의 量은 약15퀴리로 추정되고 있어서 600만퀴리로 추정되고 있는 Xe에 비해 대폭적으로 적다. 그 원인은 요오드가 原子爐內外의 물에 화합물로 녹아들어감으로서 單體요오드로 방출된 것은 적다고 생각되고 있다. 또 요오드의 化學形은 CsI였다고 추정되고 있다. 그래서 USNRC에서는 당시 카터대통령의 명령을 받아 FP舉動을 평가하는 기술적기반에 대해서 검토하여 NUREG-0772로 정리했다.

이 보고서에서 Source Term 평가에 필요한 데이터, 연구분야 등이 명백하여져서 현재 행하여지고 있는 USNRC의 核燃料損傷과 FP Source Term에 관한 (SED/FPST) 研究計劃에 대해서 위치를 확고하게 하였다. 또 USNRC는 대표적인 原子爐에 대해 Source Term을 재평가했는데, 그 결과는 BMI-2104로 보고되어 NRC의 Source Term報告書 NUREG-0956의 일부를 구성할 예정이다.

이와 같은 NRC의 Source Term 재평가에 대응해서 原子力產業界에서는 IDCOR(Industry Degraded Core Rulemaking)計劃을 실시하여 原子爐의 리스크에 대해서 검토하여 보고서를 정리했다. 이 외에도 Stone and Webster社, New York Power社, 電力研究所(EPRI: Electric Power Research Institute)에서도 각각 Source Term 평가를 했다. 모든 평가에서 WASH-1400의 Source Term 평가가 보수적임이 나타나고 있다.

한편 美國原子力學會(ANS: American Nuclear Society)에서는 특히 FP의 保持效果를 평가하여 WASH-1400의 결과와 비교하는 것을

목적으로 하는 特別委員會를 설치하여 Source Term 평가를 하였다. ANS의 Source Term 報告書는 1984년 11월에 발표되어 Source Term이 적어도 1 오더 또는 數 오더 낮아지는 것을 제시했다.

이에 대해 NRC의 委託을 받아 獨自의 立場에서 美國物理學會(APS: American Physical Society)가 Source Term 평가를 하였다. APS의 報告서는 USNRC가 이 결과를 기반으로 NUREG-0956을 정리하기로 하고 있었기 때문에 그 내용이 주목을 받고 있었는데, 1985년 2월 기자회견을 통해서 공표되었다. 이 보고서에서는 Source Term이 상당히 감소하는 것을 인정하기는 했으나, 定量的評價를 하기 위해서는 연구가 더 필요하다는 것을 지적한 점이 다른 보고서와 그 취지를 다르게 하고 있다.

이와 같이 주요한 Source Term 재평가의 보고서가 1984년부터 1985년 초에 걸쳐 발표되어 Source Term 평가에 관한 현재까지의 지식이 모두 알려졌으며, 이들 보고서의 내용을 서로 비교 검토하는 작업도 OECD/NEA에서 행해지고 있다. 이와 같은 검토는 IAEA의 INSAG(International Nuclear Safety Advisory Group)에 서로 행해질 예정이다. 이와 같은 작업을 통해서 Source Term 평가에 관한 일치된 견해가 얻어질 것으로 기대되고 있다.

2. 主要한 結果

(1) BMI-2104

BMI-2104는 USNRC가 바텔研究所(BMI: Battelle Memorial Institute)에 委託하여 실시한 Source Term 재평가의 결과를 정리한 것이다. BMI에서는 表 1 과 같이 原子爐를 대상으로 원자로의 리스크를 지배하는 事故 Sequence를 중심으로 평가계산을 하였다.

평가의 대상이 된 原子爐는 PWR(大型乾式格納容器, 아이스콘덴서型格納容器)과 BWR(MARK-I, MARK-III)에서 모두 대표적인 爐

〈表 1〉 BMI-2104의 概要

卷	對象爐型·特徵	原子爐名	對象 Sequence
第 1 卷	PWR (LARGE DRY CONTAINMENT)	SURRY (MARCH 1.1)	AB, S ₂ D, V, TMLB
第 2 卷	BWR (MARK I 型)	PEACH BOTTOM	AE, TC, TW
第 3 卷	BWR (MARK III 型)	GRAND GULF	TC, TQUV, TPI
第 4 卷	PWR (ICE CONDENSER)	SEQUOYAH	S, H, S, D, TMLB', TML
第 5 卷	PWR (LARGE DRY CONTAINMENT)	SURRY (MARCH 2.0)	AB, S ₂ D, V, TMLB'
第 6 卷	PWR (LARGE DRY CONTAINMENT)	ZION	S, D, TMLB'

〈表 2〉 USNRC의 事故時 Source Term 再評價에 使用된 코드

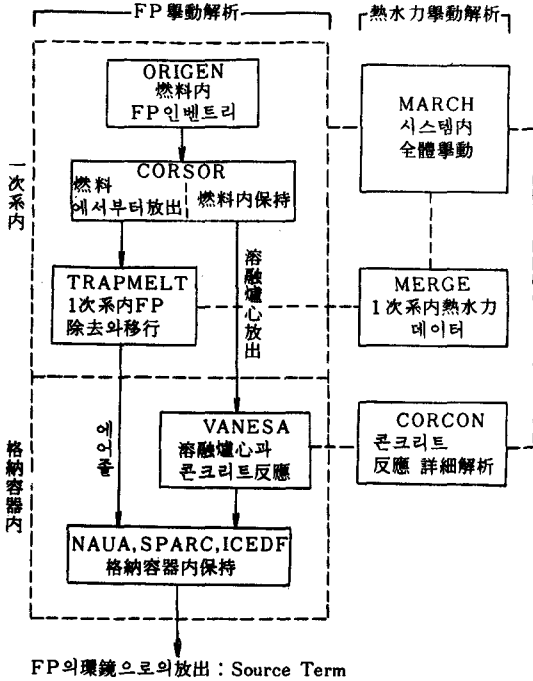
코드名	코드의機能
MARCH 2.0	事故時熱水力解析
MERGE	시스템內熱水力解析
ORIGEN 2	FP인벤토리
CORSOR	FP爐心內放出
TRAP/MELT	一次系內FP移行
CORCON	콘크리트·데브리스反應
VANESA	格納容器內에어졸生成
IDEDF	아이스 콘덴서內FP除去
SPARC	폴 스크루빙效果
NAUA-4	格納容器內FP除去效果

型이 선택되었다. 평가계산에는 表 2에 표시한 計算코드群을 그림 2의 순서로 사용했다. 계산은 원자로內의 熱水力舉動解析과 FP舉動解析으로 나눌 수 있다. 열수력거동해설의 중심은 MARCH 코드이고, FP舉動解析의 중심은 1次系統內에서 TRAP/MELT 코드, 格納容器內에서 NAUA-4 코드이다. 이중 西獨에서 개발된 NAUA-4 코드 이외에는 美國內에서 개발된 計算코드이다.

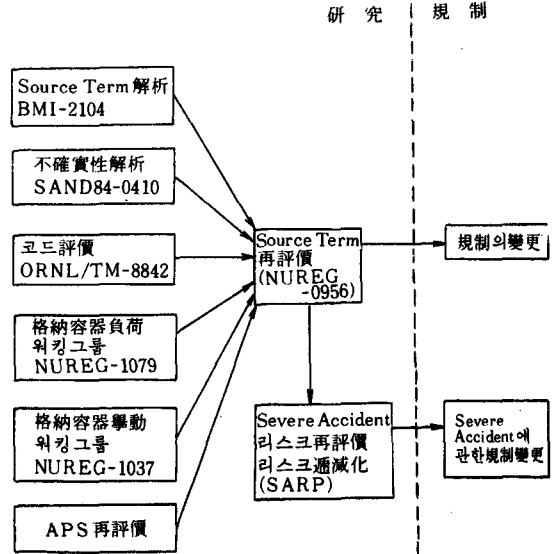
BMI에 의한 평가결과는 NRC主催에 의한 전문가검토회에서 상세히 검토되어 다음과 같은 결론을 얻고 있다.

● WASH-1400은 보수적인 가정에 따르고 있으며, FP의 除去效果가 과소평가라는 것.

〈그림 2〉 Source Term 評價計算順序



〈그림 3〉 各計劃의 相互關係



나누어서 검토를 행하였는데, 그 내용은 「現狀의 인식과 安全目標」「爐心損傷의 방지」「격납용기의 효과」「사고의 收束」「運轉制御」 각 그룹으로 나눌 수 있다. IDCOR計劃의 결론은 다음 네가지로 집약할 수 있다.

- Source Term 평가에 있어서 플랜트의體系, 事故Sequence, 格納容器破損모드 등이 결과에 크게 영향을 준다는 것.

- Source Term 평가 불확실함의 원인으로 核燃料溶解過程, 1次系統內再循環, 壓力容器內의 FP와 制御棒材料의 방출, 格納容器로의 負荷와 파손시기 등에 관한 정보의 부족이 있다는 것.

이 결론을 받아 NRC에서는 그림 3에서와 같이 不確實性的 評價, 計算코드의 評價, 格納容器負荷와 舉動의 평가를 하여 BMI-2104 및 APS의 Source Term 평가를 거쳐서 Source Term 報告書(NUREG-0956)로 정리할 예정이다.

(2) IDCOR

IDCOR計劃은 美國原子力産業會議에 의한 爐心損傷事故에 관한 평가연구계획이다. 여기서는 既知의 정보를 기초로 어느 정도 평가가 가능한가를 검토했다. 구체적으로는 24의 태스크로

- Severe Accident의 發生確率は 대단히 작다.

- FP Source Term은 종래 계산된 것보다 훨씬 작다.

- Severe Accident時的 리스크와 公衆으로의 영향은 종래의 評價値보다 훨씬 작고, NRC의 暫定安全目標보다 충분히 작다(그림 4).

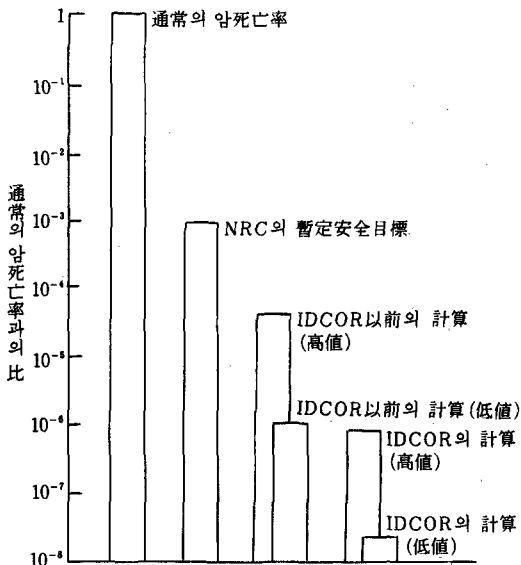
- 따라서 원자로의 設計變更, 運轉變更은 필요로 하지 않는다.

IDCOR의 보고서는 NRC에 제출되어 그 내용 및 결과의 相違에 대해 검토하는 會合이 NRC와 IDCOR間에 열리고 있다.

(3) ANS

ANS의 Source Term 再評價는 TMI-2 事故時의 요오드舉動을 명백히 할 것, FP의 1차 계통 및 격납용기내에서의 保持效果를 명백히 할 것, 工學的安全施設의 有効성을 Source Term

(그림 4) IDCOR에 의한 通常의 암死亡率과의 對比



IDCOR에서 참조한 운전중인 原電에 기인하는 晩發性암사망 리스크는 NRC 잠정안전목표의 1000분의 1이다. 이들 플랜트의 잠재적 Severe Accident 리스크는 플랜트주변 50마일내에 사는 사람들에게 대해 통상의 암사망의 100만분의 1에 불과하다.

에 관한 지식의 파악, Source Term 평가법의 검토, 지금까지의 평가결과를 정리하여서 WASH-1400의 결과와 비교 등에 대해서 조사결과가 정리되고 있다. 주요한 결론은 다음과 같다.

●從來의 Source Term은 과대평가이며, 不活性가스를 제외하고 1 내지 數 오더 적다고 생각된다. 大型乾式格納容器PWR 및 BWR-MARK-III에서 數%以下, 아이스 콘덴서型格納容器 PWR에서도 數%以下이다.

●BWR-MARK I, MARK II에 대해서는 입력 데이터 또는 계산상의 假定에 의한다고 생각되는 원인에 의해 약간 높은 값이다.

●WASH-1400에서 상정되었던 水蒸氣爆發, 水素爆發에 의한 格納容器의 早期破損은 없다고 해도 좋다. 오히려 최초부터 리크가 있을 경우가 중요하다.

●工學的安全施設에 의한 FP除去(壓力抑制탱크內 폴 스크루빙, 아이스 콘덴서內 스크루빙,

(表 3) AB Sequence에서 요오드放出에 對한 各因子的 效果 (一次系內에서의 保持效果는 考慮하지 않음)

因 子	左記의 因子만을 考慮한 放出率	前述의 因子도 포함한 放出率
一次系에서부터放出	1.00	1.00
開口部(1ft ²)*에서부터放出	0.43	0.43
擴散泳動**	0.81	0.35
浮遊液體**	0.57	0.20
格納容器外構造物**	0.55	0.11
格納容器的分割	0.60	0.066
格納容器的開口部*(0.1 vs 1.0ft ²)에서부터 漏洩	0.18	0.012

*Pre-existing opening

**格納容器에는 1.0ft²의 開口部가 있다고 하여 計算

격납용기 스프레이 등)는 대단히 효율이 좋다.

●남아있는 課題로는 構造物과 FP의 反應, 텔루륨의 舉動, 爐心損傷進行過程, 制御棒材料의 역할 등을 명백히 할 필요가 있다.

ANS의 보고서에는 Stone and Webster社가 행한 Source Term에 관한 感度解析의 結果가 기재되어 있다. 그중에서 격납용기내의 減衰效果를 나타낸 것이 表 3이다. 각각의 減衰效果는 대폭은 아니나 이것들을 고려함으로써 Source Term은 최종적으로 대폭적인 감소를 전망할 수 있다.

(4) APS

APS는 NRC로부터의 委託이기는 하나 독립적인 입장에서 Source Term 평가를 하였다. APS Source Term評價委員은 NRC나 ANS의 Source Term평가에 참가하지 않는 것을 조건으로 선발되어 中立의 입장을 유지했다. 委員은 주로 대학의 교수로 구성되어 Source Term에 관한 평가검토를 하였다. 報告書의 드래프트는 1985년2월에 발표되어 기자회견이 행하여졌다. 報告書는 8장으로 구성되어 있고, 結論과 提言은 第8章에 정리되어 있는데 주된 결론은 다음과 같다.

●一般的으로 WASH-1400以後 Source Term평가에 관한 지식이 集積되어 많은 경우 W-

ASH-1400보다 상당한 정도 Source Term이 내려갈 것이 시준되고 있다.

● 다만 溶融爐心과 콘크리트와의 반응에서 방출되는 不揮發性 FP의 방출량은 WASH-1400보다 많다. 따라서 現時點에서는 Source Term이 어느 경우에도 감소한다는 결론을 내릴 수 없다.

● FP는 종래 생각했던 것 이상으로 구조물, 건물 등에 의해 제거된다.

● 爐心損傷過程의 주요한 물리현상중에서 고려되지 않은 것은 없다고 생각된다.

● 最新의 지식을 사용해서 事故Sequence의 재선택을 행할 필요가 있다.

이 결과를 기반으로 APS는 NRC에 대해 다음과 같은 提言을 했다.

● USNRC는 Source Term평가에 관한 연구를 계속할 것.

● Source Term평가의 不確實性を 定量化할 것.

● Source Term평가에 관한 연구성과를 권위 있는 잡지 등에 공표할 것.

● 計算코드는 관심이 있는 기관이 이용할 수 있게 할 것.

APS의 결론과 제언은 Source Term의 감소를 부정한 것이 아니라, 純學術的見地에서 본 결론이며 다른 보고서의 결론과 모순되는 것은 아니라고 할 수 있다.

結 論

TMI-2事故를 계기로 시작된 Source Term의 평가는 많은 작업이 끝나고 보고서가 작성되었다. 그중에서도 BMI-2104, IDCOR, ANS, APS 각 보고서는 각각 조금씩 다른 목적으로 행해진 Source Term평가의 정리이며, 모두 내용이 풍부한 보고서이다. 이들 보고서의 공통된 결론은 WASH-1400의 假定은 대단히 보수적이

며, Source Term을 과대평가하고 있다는 것이다. 그러나 어느 정도 보수적인가, Source Term은 어느 정도인가라는 設問의 대답은 각각 다르다. 이것은 평가에 있어서 設定條件의 차이를 들 수 있으나, 많은 경우 現象에 대한 불명확함에서 오는 평가결과의 불확실함에 유래한다. 이와 같은 것은 ANS와 APS가 모두 不確實性的의 定量化를 앞으로의 과제로서 들고 있는 것으로도 명백하다.

앞으로 Source Term평가의 움직임으로는 평가상의 不確實性を 定量化하기 위한 실험의 실시와 計算코드의 성능평가가 예상된다. 특히, 計算코드를 檢證한다는 것은 Source Term평가의 신뢰성을 좌우하는 것으로서 앞으로 중요한 과제가 될 것이다. 그리고 NRC는 Source Term報告書(NUREG-0956)를 발표할 예정이나, 定量的으로 Source Term감소를 결론내리는 것은 아닐 전망이다.

이달의 到着資料

- ◇ Nuclear News<ANS> 7月號
- ◇ INFO<AIF> 7月號
- ◇ ATOM<UKAEA> 7月號
- ◇ Nuclear Europe<ENS> 7/8月號
- ◇ Atoms in Japan<JAIF> 6月號
- ◇ 原子力産業新聞<日本原産> 1292號, 1293號, 1294號
- ◇ 原子力工業<日本日刊工業新聞社> 8月號
- ◇ 原子力文化<日本原子力文化振興財團> 7月號
- ◇ Bulletin<BNF> No. 5
- ◇ Nuclear Industry<AIF> Vol. 32, No. 4
- ◇ French Nuclear Newsletter No. 2
- ◇ KORT NYT<DANATOM> No. 190
- ◇ Nuclear Engineering International<NEI> Vol. 30, No. 372