



Session 1 원전의 내진 안전성

## 후쿠시마 사고의 교훈과 원전 내진 안전성 관리

Tsuyoshi Takada

도쿄대 공학대학원 교수



저는 도쿄대학교에서 근무를 하고 있으며 수 년 동안 리스크 공학과 구조의 신뢰성에 대한 연구를 진행해왔다. 또한 건물뿐만 아니라 원전에 대한 구조공학과 지진과 관련된 내진 분야에 대해서도 많은 연구를 진행하고 있다.

먼저 후쿠시마 다이찌 원전 사고의 교훈에 대해서 말씀 드리고, 두 번째는 신규 원자력 안전규제 기본 방침에 대해서 일본 내에서 마련된 방침과 규제 당국의 입장에서 규제의 입장에서 다루어 보도록 하겠다. 세 번째는 리스크 관리의 필요성과 리스크 절감에 대해서 말씀 드리겠다.

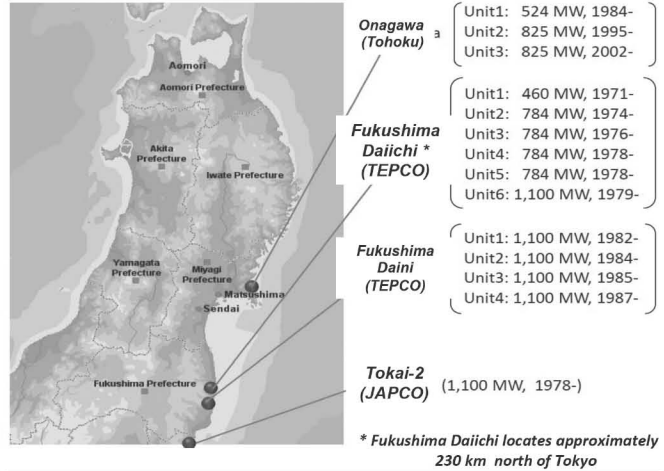
### 후쿠시마 다이찌 원전 사고

2011년 3월 11일 당시의 지진 강도는 굉장히 크게 기록이 되었다. 그 진동이 수백km에 달하는 거리에서도 느껴질 정도였다. 이러한 강도의 지진은 실제로 과거에 전례 없었던 그런 지진이였다. 일본지질학회에 따르면 이 지반 운동이 5, 6 이상으로 느껴졌다고 되어 있다. 이것은 굉장히 큰 지반운동으로 약 300gal 정도에 달하는 지반 움직임이다.



<그림 1>

### NPPs in North Eastern Coast of Japan



<그림 2>

당시에 지진학자들이 생각했던 것이 이 지역은 300년 이상의 축적된 경험을 바탕으로 했을 때 각각의 segment들이 지진이 일어났던 곳으로 약 7.8 혹은 7.5 규모 정도의 지진을 겪었던 곳이지만, 이 지역이 동시에 이렇게 지진으로 인해서 움직일 것이라고는 예상을 못했다. 300년 이상의 지진과 관련된 경험이 있음에도 불구하고 3월 11일에 있었던 일본 대지진은 예상을 하지 못했던 것이다. 지진계를 이용한 분포도를 보면 600gal에 달하는 지진의 움직임을 보였고 원전 설계 기반에 초과하는 정도 수준의 그런 지진이었다.

이 지진은 여진도 굉장히 많이 일어났다. 3월 11일 지진이 있는 이후에 하루에 160건의 여진이 있었는데 여진의 수는 줄어들고 있지만 여진이 여전히 발생하고 있다. 5 규모 이상의 지진이 약 600건 정도 있었는데 이는 1년 내에 발생한 것이다. 이러한 수의 여진으로 인해서 원전의 복구에 많은 영향을 주고 있다.<그림 1>

이 지역은 약 40m 정도의 높은 해일이 일었는데

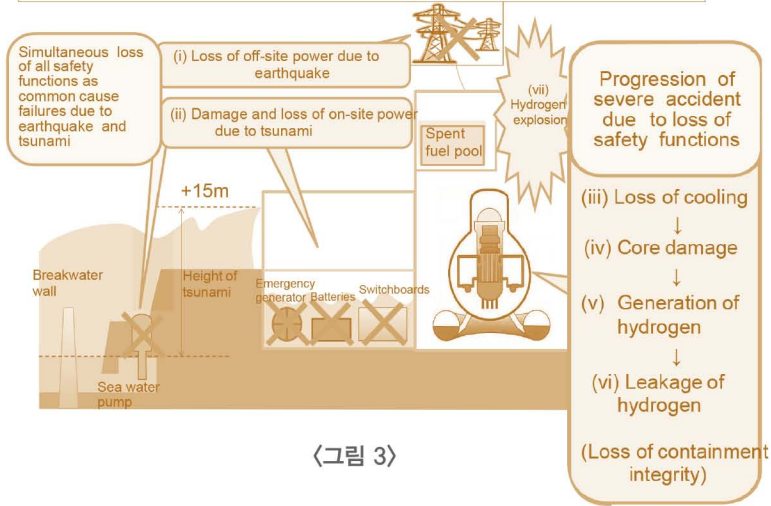
이로 인해서 원전이 큰 영향을 입었고, 특히 후쿠시마 다이찌 원전이 큰 영향을 입게 되었다. 몇건의 쓰나미가 과거에 있었는데 1939년, 1978년에 지진이 있었고 또 메이지 산리쿠 지진이 1986년에 있었다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통해서 어느 경로로 이루어지는지를 파악을 할 수가 있었는데 센다이 지역 인근에서 굉장히 높은 쓰나미가 있었던 것을 알 수 있다. 하지만 그 지역과 비교했을 때 후쿠시마 다이찌 원전이 위치해 있는 지역은 예전에는 그렇게 해일이 많이 없었던 지역이었다. 그래서 그런 사항을 과거의 기록을 통해서 저희가 파악을 할 수 있었습니다.

<그림 2>를 보면 북동쪽 해안선을 따라서 위치해 있는 원전의 모습을 볼 수 있다. 도후쿠 전력이 운영을 하고 있는 오나가와 발전소, 도쿄전력이 운영하고 있는 후쿠시마 다이찌, 후쿠시마 다니 발전소가 있다. 도카이 발전소는 JAPCO에 의해서 운영되고 있다. 3월 11일 동일본 대지진이 있었을 때 후쿠시마 다이찌 발전소를 제외한 다른 발전소들은 안전한 상



### Progression of the Accident

- > All safety functions were lost simultaneously due to the earthquake and tsunami.
- > The initial impact spread and the crisis eventually developed into a 'severe accident.'



<그림 3>

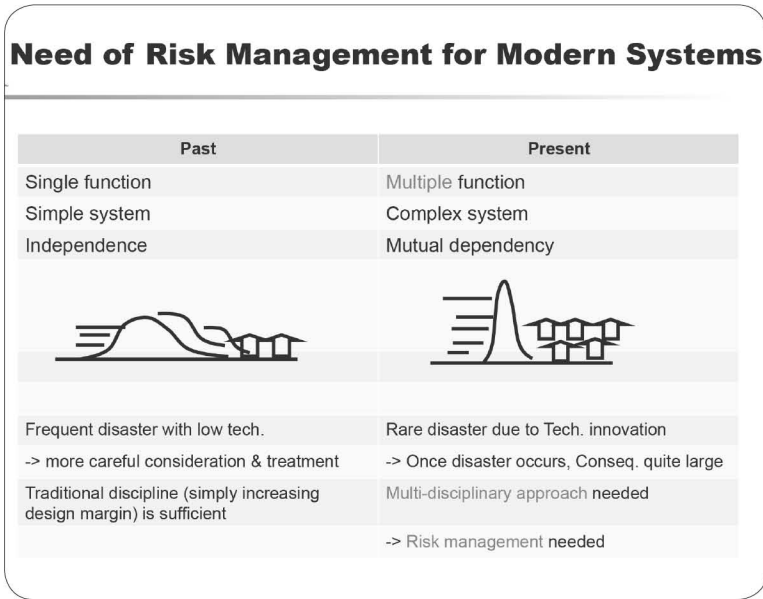
황이었다. 발전소 부지에 대한 최대 가속도를 파악했는데 오나가와나 후쿠시마 발전소 같은 경우에 거의 설계 기반의 상응하는 그런 정도의 가속도였다.

그럼 간략하게 왜 이 사건이 발전하게 되었는지에 대해서 말씀을 드리면, 지진이 발생해서 자동으로 원자로가 정지하게 되었고 지진이 거의 모든 지역을 흔들었기 때문에 소외 전원 상실이 발생했다. 이로 인해서 EDG가 자동 기동하고, 노심 냉각 계통이 기동을 하였다. 이 지진이 발생한 몇 시간 후에 해일이 일어났다. 이런 해일이 발생했을 경우에 설계 기반은 5.7미터인데 당시의 해일의 높이는 15미터 이상 이었고 굉장히 큰 높이였기 때문에 발전소에 큰 영향을 주게 되었다. 그래서 다중 혹은 공통 원인 고장이 발생되면서 EDG, 노심 냉각 기능이 유실되고 노심 손상이 있게 되었다. 궁극적으로 격납이 제대로 이루어지지 않게 되었을 뿐만 아니라 원자력 건물에 대한 누수가 있었고 또 수소 폭발이 발생했다. 그리고 외부 방사선 물질이 유출되었다. <그림 3>

### 교훈과 실천

이 사고를 통한 교훈을 본다면, 과거에 이런 큰 지진을 경험한 적이 없었고, 전례 없는 사건이었지만 미래를 봤을 때 굉장히 불확실성이 많다는 것을 감안하고 있어야 한다는 것이 이 사건으로부터 배울 수 있는 가장 큰 메시지가 아닐까 한다. 그 다음은 다중 위험 문제이다. 지진이 발생했고 또 그 이후에 해일이 일어났다. 여러 가지 자연재해가 동시에 발생할 수 없을 것이라고 생각한 것이 문제였다. 지진으로 인해서 동시에 모든 안전 기능이 영향을 받았다는 것은 굉장히 큰 문제라고 할 수 있다. 후쿠시마 다이이치 원전 같은 경우에는 6호기로 구성되어 되어 있고, 이 6호기가 모두 손상을 입었다. 다수 호기, 다수 사이트, 다수 발전소에 영향을 줄 경우에, 특히 이렇게 해안선에 발전소들이 이렇게 위치해 있었기 때문에 동시에 영향을 받게 되었다.

마지막으로 강조하고 싶은 원자력 사고는 일어났



〈그림 4〉

다는 것이고, 설계를 통해서 사고 영향 완화를 해야 할 필요성이 있는지, 이를 통해서 사고 방지를 추가적으로 할 수 있는지에 대해서 생각을 해봐야 한다는 것이다. 실제로 사고를 예방할 수 있도록 설계를 해야 하지만, 사고가 발생했다면 그 이후에는 어떻게 이것을 완화할 수 있을까 하는 것까지 고려하는 설계를 마련하는 것이 중요하다.

〈그림 4〉는 과거와 현재의 공학 시스템을 비교해 보는 것인데, 원전에서의 시스템을 비교해 놓은 것이다. 과거에는 단일 기능을 가지고 있는 시스템이 많이 있었지만 현재의 시스템들은 다중 기능을 가지고 있다. 아이폰을 생각해 보면 쉽게 이해가 된다. 지금 아이폰에는 굉장히 많은 기능이 있는데 과거의 전화기와는 차이가 나는 부분이다. 과거의 시스템들은 독립적인 시스템이었다. 다른 시스템과 연계가 되어 있지 않았다. 하지만 현재의 시스템 계통은 상호 의존적이다.

〈그림 4〉를 보면 과거에는 최첨단 기술이 없었기 때문에 높은 방조제를 만들지 못했다. 그래서 이 지역은 굉장히 위험할 수도 있다는 것을 그림을 보면 알 수가 있다. 왜냐하면 해일의 리스크가 있기 때문이고 방조제가 높지 않기 때문이다. 하지만 지금은 최첨단 기술이 있기 때문에 이렇게 높은 해일 방벽을 만들 수가 있다. 그래서 이 지역이 이제는 과거에 비해서 안전하게 된 것이다.

그런데 이 지역은 굉장히 안전하다 그래서 걱정을 할 필요가 없다라고 얘기를 할 수도 있지만, 그것은 사실이 아니다. 왜냐하면 어떤 사건이 발생하면 다시 그 지역은 굉장히 위험한 지역으로 바뀔 수도 있기 때문이다. 그래서 현재 이제 이 사고가 발생하면 그 결과는 더 크게 미칠 수가 있다. 오히려 과거보다도 더 큰 결과가 받을 수도 있다는 것이다.

그러면 이런 상황을 어떻게 해결하고 결합할 수 있

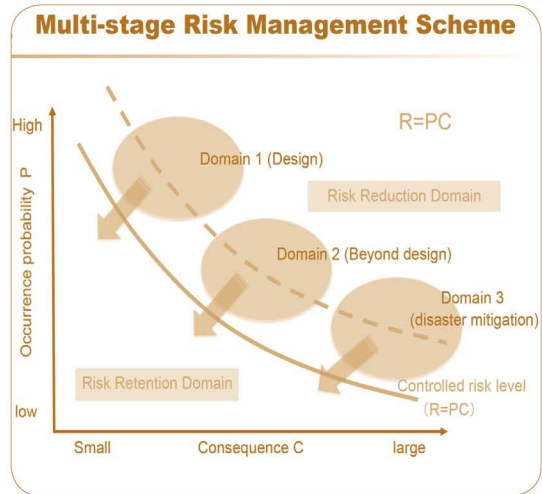


을까? 일단 많은 데이터와 경험치가 있다. 그리고 빈번한 자연재해를 경험해 왔기 때문에 어디에 건물을 세워야 하고 어디에 서 있어야 되는지에 대해서 굉장히 주의를 기울여야 한다. 그리고 뭔가 발생하면 정통적인 방법을 쓰는 경우가 있는데, 단순히 설계 여유도를 증가시키는 것이다. 이렇게 하면 좀 쉽기는 하다. 이것만 가지고도 과거에는 충분하다고 생각을 했다.

하지만 현재 이러한 상황이 발생하면 종합적인 다양한 학문을 접목한 그런 접근 방식이 필요하다. 왜냐하면 더 이상 이것은 단순한 문제가 아니고 독립적인 하나의 문제가 아니기 때문이다. 그래서 리스크의 관리, 리스크 개념에 대해서 잘 생각할 필요가 있는데 그 전에 일본의 규제 당국이 어떠한 정책을 만들고 있는지에 대해서 말씀을 드리도록 하겠다.

이 사건이 있는 이후에 새로운 안전 규제를 마련했다. 원자력 규제 법안을 2012년에 개정을 했다. 이 규정을 준수해야만 허가가 내려지고 여러 가지 의무로 진행해야 되는 부분이 있다. 설계기준을 강화하고 또 중대사고 관리라던가 지진이나 해일에 대한 그런 대책도 강화가 될 수 있도록 요구를 하고 있다.

과거에도 이런 요구, 규제 요건이 있었는데 이때는 자연재해, 화재 방호, 전원 공급, 이런 부분이었지만 이제는 추가적인 격납용기 예방이라던가 특별 안전 시설, 그리고 노심 손상 방지와 같은 새로운 내용들이 추가되었다. 이를 통해서 사고가 발생했을 때 사고 영향을 완화할 수 있도록 하는 것이다. 또 강화해야 되는 부분이 있는데 이것은 과거와 유사하다. 자연 현상에 대한 부분, 신뢰성, 그리고 또 내진 저항도에 대한 부분, 해일 저항도에 대한 부분도 강화가 된 규제 요건들이다. 그래서 이를 통해서 현재 NRA가 어떤 규제 활동을 벌이고 있는지를 파악할 수 있다.

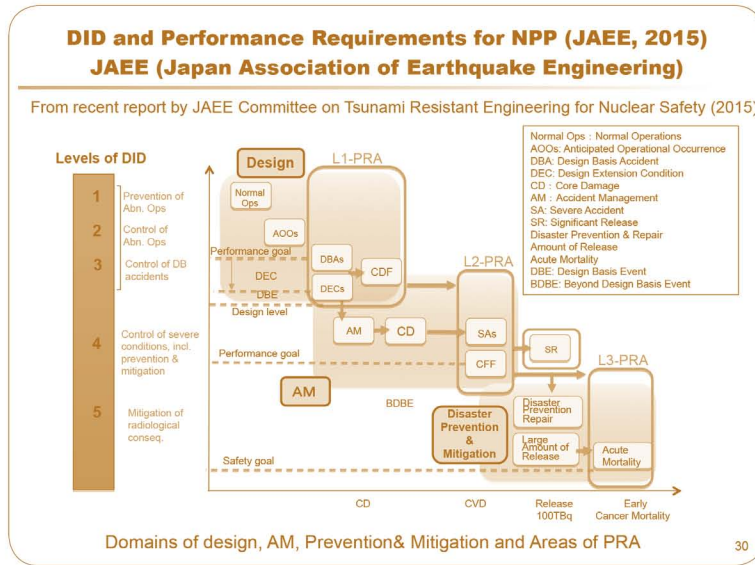


〈그림 5〉

### 리스크 관리

다음으로 리스크 관리에 대해서 말씀을 드리도록 하겠다. 굉장히 불확실성이 많이 발생하고 있는 가운데서 이 시스템이 안전한지 안전하지 않은지를 파악하기 어렵다. 회색지대가 있기 때문이다. 그러면 현재 우리가 안전한가 아니면 조금 더 위험한 쪽에 있는가를 잘 생각을 해봐야 한다.〈그림 5〉

리스크에 대한 정의를 먼저 살펴해보도록 하겠다. 엔지니어링 커뮤니티에서 활용하는 정의인데 손실 가능성, 손실 정도에 대한 확률을 리스크로 본다. 그래서 리스크는 사건 가능성과 그리고 사건의 영향 또는 손실을 곱한 수치이다. 평가, 분석, 관리기법, 리스크 수용, 커뮤니케이션, 이런 모든 것들이 리스크 관리를 위해서 이루어져야 되는 중요한 요소이다. 그리고 리스크 전이나 리스크 최적화도 굉장히 중요한 부분이며 리스크 보유, 또 어떻게 우리가 리스크를 감당



〈그림 6〉

**Levels of Defense in Depth (INSAG-10, 1996)**

Level of DID	Objective	Essential means
Level 1	Prevention of abnormal operation and failures	Conservative design and high quality in construction and operation
Level 2	Control of abnormal operation and detection of failures	Control, limiting and protection systems and other surveillance features
Level 3	Control of accidents within the design basis	Engineered safety features and accident management
Level 4	Control of severe plant conditions, including prevention of accident progression and mitigation of the consequence of severe accidents	Complementary measures and accident management
Level 5	Mitigation of radiological consequences of significant releases of radioactive materials	Off-site emergency response

〈표 1〉

할 것인가도 역시 리스크를 관리하는 데 있어서 굉장히 중요하다. 또 커뮤니케이션을 리스크하는 것이 굉장히 어렵다고 하는데 이것도 중요한 부분이다.

그럼 리스크 감소를 어떻게 행할 것인가? 리스크를 줄이려고 할 때 몇 가지 영역에 있어서 조치를 취해야만 리스크를 줄일 수 있다. 첫 번째의 영역은 설계와 관련된 부분이고, 두 번째 부분은 설계기준 초과

사건에 대한 부분이다. 세 번째는 사고 완화에 대한 부분이다. 이런 리스크 영역에 있어서 각각 다른 조치가 이루어져야 하고 동시에 이러한 각각의 영역들이 심층 방어 개념과 연계가 되어 있다고 생각한다.

〈표 1〉은 INSAG-10에서 제안한 개념이다. 각각의 레벨 1부터 5까지 어떤 식으로 조치를 해야 하는지 기술이 되어 있다. 1부터 3까지는 굉장히 친숙하지만, 보통 4하고 5까지는 조금 익숙하지 않다.

이런 모든 개념과 심층 방호 개념과 리스크 관리 개념을 결합한 것이 일본지진공학회에서 제안한 개념이다.〈그림 6〉 일본지진공학회에 해일 설계에 초점을 맞추고 있는 특별위원회가 있다. 같은 수치와 개념 그리고 DID가 어떻게 적용되는지가 모두 기술이 되어 있고 설계부문, 사고 관리 부문, 사고 예방 영역이 각각 기술되어 있다. 그래서 레벨 1 PRA에 의해서 검증이 될 수가 있고, 레벨 2같은 경우에는 레벨 2 PRA에서, 세 번째 부분은 레벨 3 PRA에서 검증될 수 있다. ☺