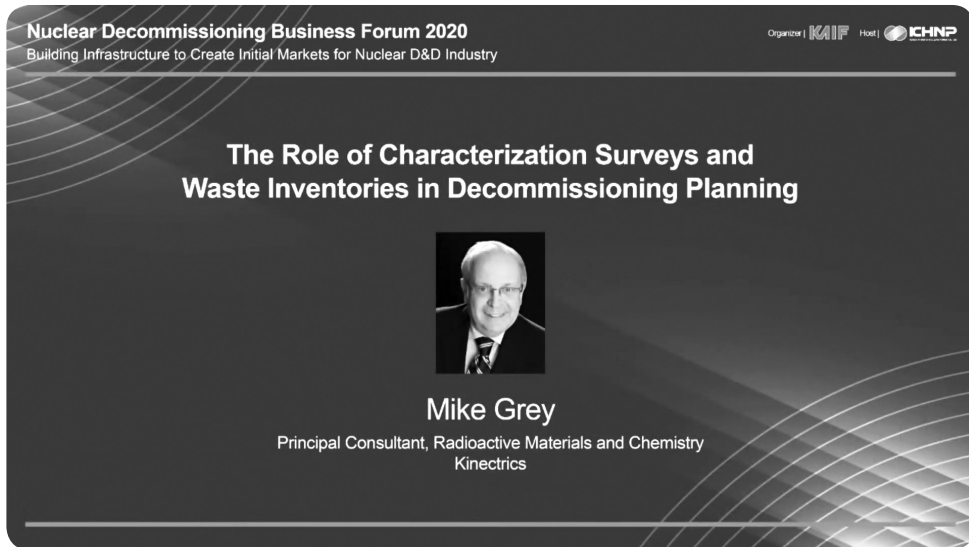


해체계획에서 특성조사와 폐기물 재고량 평가의 역할

Mike Grey

캐나다 Kinectrics 방사성물질 및 화학부 수석 컨설턴트



오늘 해체계획에서 오염특성조사, 그다음에 폐기물 재고량 평가의 역할에 대해서 말씀을 드리겠습니다. CANDU오너스그룹(CANDU Owners Group)과 함께 폐기물 재고조사 방법을 CANDU 600 노형에 대해서 개발한 내용과 그 결과, 그리고 결론으로 넘어가겠습니다.

배경

저희 경험을 비춰보면 해체과정에서 발생한 폐기물에 대한 관리방안을 제대로 준비를 하지 않으면 일정이 지연되거나 비용이 추가됩니다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 해체계획에서 폐기물 중

심적 접근법을 활용하게 됩니다. 이 방식은 해체계획에서 폐기물 관리를 중요하게 다루는 것입니다.

하지만 그렇게 하기 위해서는 발생할 폐기물의 종류와 양에 대한 다양한 지식과 정보가 필요합니다. 폐기물 재고량 조사를 통해서 이러한 폐기물이 무엇인지 알아낼 수 있고, 이것을 계획단계에서 쓸 수 있습니다. 그리고 이것은 지속적으로 업데이트 되어야 합니다.

폐기물 재고 개발

저희 경험에 따르면, 해체계획 초기에 발생하는 폐기물 목록에는 수백 개의 아이템이 있습니다. 그

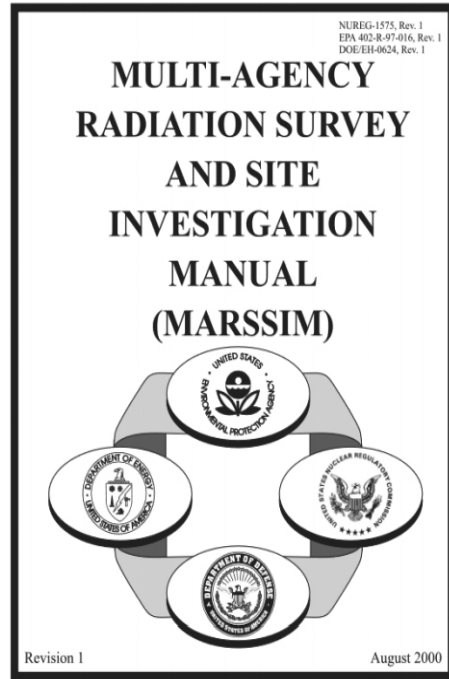
런데 계획이 진행되면서 인벤토리가 더욱 복잡해 집니다.

그리고 설비 운영 기간이 끝나면, 이 폐기물 인벤토리의 아이টে이 수천 개가 됩니다. 그리고 세부계획으로 넘어가면서 수천, 수만 가지의 아이টে이 만들어 집니다. CANDU 600의 경우에는 저희가 2,335개의 아이টে이를 파악했습니다. 특히 세부계획 단계에 들어가면, 많은 아이টে이 파악됩니다. 그리고 폐기물 재고목록을 만들기 위해서는 시설에 대해서 다양한 지식을 갖고 있어야 합니다.

그리고 폐기물에 대해서도 특성화 조사가 필요 합니다. 그리고 잠재적인 폐기물 특성이라든가 폐기물의 방사능 오염 정도, 유해물질의 오염 정도에 대해서 알아야 됩니다. 이 특성화라는 것은 시설에 있는 계통, 계기 구조물의 방사선 화학적 특성에 대한 이해를 높여가는 과정입니다.

특성화

이 특성화에 대한 접근법은 미국에서 개발된 것이 있는데, 미국 원자력규제위원회(NRC, Nuclear Regulatory Commission)와 국방부, 에너지부, 그리고 환경부가 함께 만든 것입니다. 이러한 방법을 마스심(MARSSIM, Multi-Agency Radiation Survey and Site Investigation Manual)이라고 부르는데, 캐나다에서도 도입했습니다. CSA N294 표준에 원자력 시설의 해체 관련해서 도입했습니다. 그래서 이 프로세스는 모든 위험물질에, 그러니까 방사능 물질뿐만 아니라 모든 위험물질에 대해서



[그림 1] MARSSIM(Multi-Agency Radiation Survey and Site Investigation Manual)

적용하고 있습니다.

이 마스심은 미 환경청에서 DQO(Data Quality Objective)라는 데이터 품질목표를 반복적으로 적용하고 있습니다. 이 DQO 프로세스의 목적은 조사를 통해서 충분한 양질의 데이터를 수집하고, 이를 통해서 프로젝트의 목표를 달성하는 것입니다. 그래서 자원효율적인 데이터 수집을 가능하게 하는 것이고, 이 프로젝트를 지원하는 이유입니다.

마스심은 DQO 프로세스를 활용하는데, 이것은 다섯 가지의 단계로 이루어져 있습니다. 이 마스심이 DQO 프로세스를 5번 반복을 하게 됩니다. 특성화 단계에서 이렇게 반복을 하게 되는 것입니다.

마스심 프로세스의 다섯 가지 단계에 대해서 말

쓰음을 드리면, 첫 번째는 부지 이력조사입니다. 부지 이력조사는 시설이 섰다운 되기 전에, 아니면 섰다운 바로 이후에 진행이 되고 있는데, 해체에 중요한 지식을 수집하고 보존하는 조사입니다. 예를 들어서 시설에서의 운전기록, 그리고 그러한 조사 결과가 해체 과정에 사용되고 있습니다. 기관의 지식, 예를 들어서 발전소 종사자와의 인터뷰 자료도 활용이 됩니다.

그다음 두 번째는 관찰 조사(Scoping Survey)입니다. 이것은 섰다운 이후에 바로 진행됩니다. 그리고 관찰 조사를 통해서 오염원과 오염물질의 분포를 파악합니다. 비침습적인 방법으로 많이 진행되고, 샘플 수집도 진행합니다. 소규모로 조사가 진행되는데 앞으로 무엇을 조사해야 하는지에 대해서 방향을 잡는 것입니다. 오염물질 분포에 대한 통계를 내게 됩니다.

세 번째 단계는 가장 포괄적인 조사로서 바로 특성화 평가입니다. 포괄적이고 상당히 세부적인 계획입니다. 세부적인 해체계획을 만들기 전에 수행되며 세밀한 조사이기 때문에 1년 정도 소요되고, 사전에도 세부적인 계획이 필요합니다.

네 번째 단계는 개선조치 조사라고 합니다. 해체작업이 진행될 때 이러한 조사가 진행됩니다. 그리고 이러한 조사를 통해서 해체작업이라든가 아니면 해체 결과를 지원하고 또 평가하게 됩니다. 이를 통해서 나중에 프로세스의 마지막 단계에 중요한 정보가 나오게 됩니다.

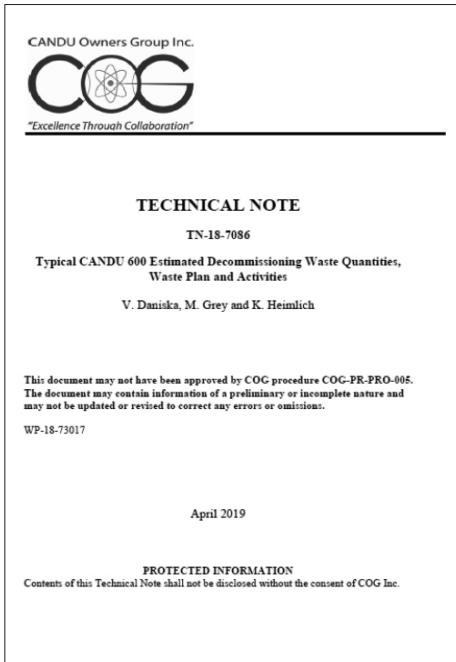
그다음 마지막으로 최종 부지 해체조사가 있습니다. 해체가 완료되고, 기대했던 상태를 달성했다

는 객관적인 증거를 제공하기 위해서 수행됩니다. 마스심의 각각 다른 단계에 대해서 계획하는 것은 그전에 단계에서 나왔던 결과를 바탕으로 이루어 집니다. 그래서 전 단계를 거쳤을 때 나온 결과를 가지고, 그다음 단계로 넘어간다고 보면 됩니다. 그래서 최종 부지해체 조사까지 그 이전에 조사 결과가 활용됩니다.

마스심에 대해서 말씀드리면, 필수적으로 권고를 하고 있지 않지만, 일종에 권고사항으로 모델링을 사용하라는 내용이 있습니다. 시설, 구조물, 계통기기의 방사능 정도에 대한 사전지표를 제공하게 되는데, 이제 가이드가 나와 있는데 폐로 응용활용을 위한 유도 활성화 방사선의 평가에 대한 방법론이라는 것입니다. 이것이 상당히 유용하게 사용될 수 있습니다. 그런데 모델링에서 문제가 있는데, 활성화에 대해서 말하고 있지만 오염에 대해서는 정보를 제공하지 않습니다. 그래서 프로세스의 인풋으로는 중요하게 사용이 될 수 있지만, 이러한 한계점이 있습니다. 그렇지만 저는 모델링은 꼭 필요하다고 생각하고 있습니다.

CANDU 600 폐기물 재고

저희가 CANDU 600 노형에 대해서 폐기물 인벤토리를 만들었는데, 코그(COG, CANDU Owners Group)에서 지원을 받아서 2년 전에 진행했습니다. 저희가 체르노보다(Cernavoda) 1, 2호기를 기본 베이스로 활용을 했습니다. 그리고 저희가 사전 해체계획을 그 전에 미리 완료했습니다.



[그림 2] COG TECHNICAL NOTE 표지

이러한 사전계획을 할 때 사전 특성화 조사를 했습니다. 그래서 예비해체계획서를 준비할 때 만들어진 사전 특성화 조사를 통해서, 칼란드리아(Calandria) 폐기물, 체르나보다 1, 2호기에 대해서 상세한 제거 계획을 세웠고, 그다음에 이러한 발전소의 사전 특성화 조사결과를 통해서 CANDU 600에 대한 일반적인 인벤토리가 만들어졌습니다.

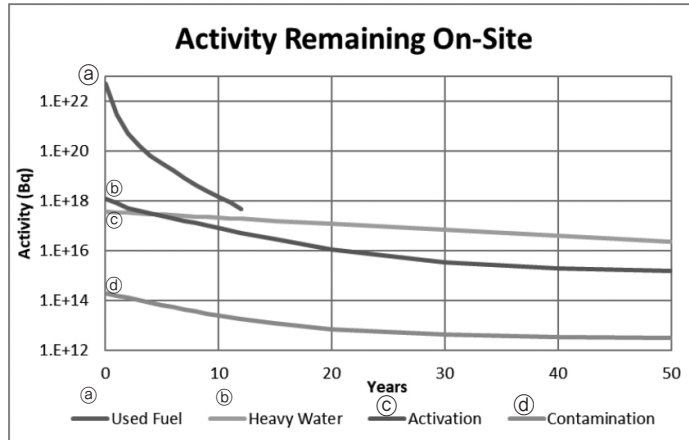
그리고 동시에 진행이 됐던 또 다른 COG 프로젝트가 있습니다. 칼란드리아 폐기물에 대해서 해체 프로젝트입니다. 그 폐기물에 대해서 상세하게 재고 목록이 만들어졌는데, 캐나다 피커링 원전인데 지금 CANDU와는 조금 형태가 다르지만, 저희가 이 두 가지를 비교할 수 있었습니다.

체르나보다 1, 2호기에 대한 프로젝트를 진행했

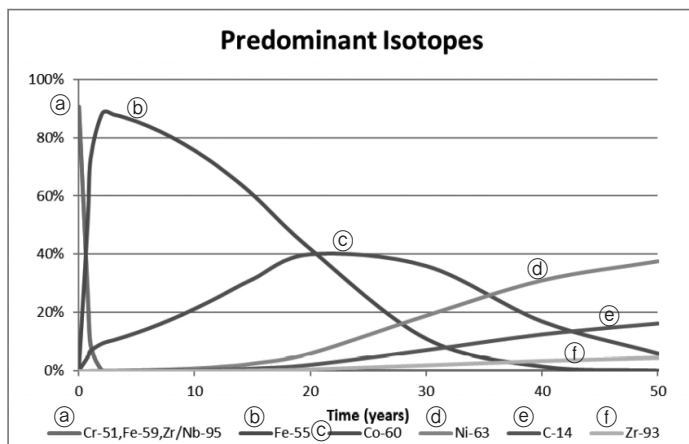
다고 말씀드렸는데, 여러 가지 치수나 재료 및 기타 파라미터(parameter)가 포함되었고, 세부적으로 목록을 작성했습니다. BSI(Basic Subject Index)를 기준으로 이 재료 인벤토리와 특성화를 진행했습니다. 그래서 폐기물 목록 작성 시 BSI를 통해서 상호참조가 가능합니다. 그리고 이것이 폐기물 인벤토리의 기본을 구성하게 됩니다. 이외에도 경험, 그리고 여러 가지 전문적 판단을 통해서 이러한 것들을 뒷받침하게 됩니다. 그래서 이 인벤토리에는 어느 정도의 불확실성이 들어가 있습니다.

이 특성화는 몇 가지 취약점을 갖고 있는데, 지금까지 완벽하게 해체된 CANDU 노형이 없습니다. 그렇기 때문에 해체 운전경험이 없습니다. 물론 개량 프로젝트도 있었고, 그 다음에 기기교체 프로젝트도 있었습니다. 그리고 운전경험과 방사선 조사에서 나온 여러 가지 정보가 있습니다. 그리고 여러 오염, 예를 들어서 연료채널이나 아니면 여러 가지 다른 기기의 교체 관련 정보가 있는데, 이러한 정보를 저희가 많이 수집할 수 있습니다. 그런데 그러한 정보들은 900MW 시설에서 나타나기 때문에 저희가 600MW 플랜트에 맞도록 조정을 했어야 했습니다. 그래서 특성화의 불확실성이 발생할 수밖에 없는데 이것을 회피할 수 없습니다.

그리고 다른 CANDU 플랜트와 마찬가지로 체르나보다 같은 경우에는 지연 해체전략을 따르고 있습니다. 그래서 30년 동안 기다린 이후에 해체가 진행이 되는데, 이런 경우에 해체에 30년간의 집행 연기 기간이 있다는 것을 우리가 고려해야 됩니다. 그렇기 때문에 그러한 상황은 다른, 예를 들어서 월



[그림 3] 현장에 남아 있는 활동



[그림 4] 시간별 주요 동위원소

성과 같은 발전소와는 좀 상황이 다를 것이라고 생각합니다. 왜냐하면 그 지연기간이 조금 다르기 때문입니다.

1. 예비 특성화 결과

[그림 3]과 [그림 4]는 특성화의 일부 결과입니다. 지금 부지에 총 활성화도를 보시면 사용후연료의

활성도가 상당히 높습니다. 체르노보다 같은 경우에는 셋다운 이후에 12년 이후의 연료가 제거됩니다. 그다음에 중수도가 가장 큰 활성화를 보이고 있습니다. 현재 체르노보다 같은 경우에는 중수도를 어떻게 처리할지에 대한 계획이 아직은 없는 상황인 것으로 알고 있습니다.

그리고 칼란드리아 활성화도에 대한 데이터도

있습니다. 그다음에 1차 열수송 계통에 대한 저준위 오염에 대한 특성화도 있는데, 이러한 저준위 오염에 대한 특성화를 하는 것이 상당히 어렵습니다. 왜냐하면 발전소 전반에 퍼져있기 때문입니다. 그래서 이 부분은 조금 어려움이 있다고 말씀을 드리겠습니다. 그렇기 때문에 어느 정도 판단이 들어가야 하는 부분입니다.

그 다음에 유사한 방사성 동위원소에 대해서 말씀을 드리면 초반에는 반감기가 짧은 동위원소가 상당히 많습니다. 예를 들어서 지르코늄(Zr)이나 니오븀(Nb)-95, 철(Fe)-59, 그 다음에 크로뮴(Cr)-59 등이 있습니다. 그런데 이러한 동위원소들은 금방 사라집니다. 1~2년 정도면 쯤다운 이후에 사라집니다.

그런데 제가 놀란 것이 있었습니다. Fe-59 같은 경우에 쯤다운 이후에 20년 동안 가장 많이 발견이 되는 그러한 동위원소인데, 제가 처음에 보건물리학을 공부를 했습니다. 그렇기 때문에 저희가 이러한 동위원소를 연구할 때 방사선 방호 측면에서 중요한 것들에 대해서 신경을 쓰는데, Fe-59는 저희가 많이 신경을 쓰는 그러한 동위원소는 아닙니다. 왜냐하면 방사선 방호와 관련해서는 그렇게 중요하지 않기 때문입니다.

그런데 Fe-59가 발전소에 이렇게 많이 나타난다는 거에 대해서 제가 상당히 놀랐습니다. 유동기속 부식이 발생하면서 피더(feeder) 파이프 안에 이제 원자로 안에서 활성화가 많이 이루어지고, 이것이 1차 열수송계통을 통해서 분포를 하게 되는데, 폐기물이 해체 때 많이 나오게 되는데, 제가 Fe-55가

많이 나올 거라고 생각하지 않은 것입니다.

코발트(Co)-60은 물론 당연히 많이 나옵니다. 쯤다운 이후에 20년, 40년 동안 많이 나오고, 그 다음에 니켈(Ni)-63이 많이 남아있습니다.

그렇지만 이러한 Fe-59나 Ni-63이 물론 해체계획에 중요합니다. 그런데 이러한 동위원소는 우리가 조사를 할 때는 많이 드러나지 않습니다. 그렇기 때문에 우리가 사전에 이러한 것들을 고려해서 특성화 조사를 할 때에 폐기물과 관련해서 파악해야 되는 것입니다. 그리고 계획할 때 이러한 동위원소들은 폐기물 포장을 하면 탐지가 잘 안 됩니다. 그렇기 때문에 포장 전에 파악하는 것이 중요합니다. 그리고 이것을 인벤토리로 만들어야 합니다. 그래서 앞으로 우리가 계획을 할 때 이러한 활동을 하는 것이 매우 중요합니다.

2. Fe-55

Fe-55에 대해서 조금 더 말씀드리겠습니다. 앞서 말씀드렸듯이 피더 파이프에서 나오고, 낮에 에너지 X-선을 발생시킵니다. 1차적인 붕괴는 전자 포착으로 이루어집니다. 활성화된 Fe-55로부터 상당히 소프트한 X-선이 방출되게 됩니다. 액체섬광계수기(liquid scintillation counter)으로 탐지가 될 수 있습니다. 그래서 샘플링과 실험실의 분석이 필요합니다. 이동식 장비로 탐지할 수 있는 것은 아니고 포장된 폐기물에서 탐지할 수 있는 것도 아닙니다. 그렇기 때문에 우리가 항상 사전에 고려를 해야

하는 부분입니다.

3. CANDU 600 폐기물 재고

이제 폐기물 인벤토리를 몇 가지 카테고리로 분류할 수 있습니다. 중준위 폐기물이 있는데, 주로 칼란드리아에서 나오게 됩니다.

그다음에 저준위 폐기물이 있고, 규제면제 폐기물이 있습니다. 그다음에 비활성화 재활용 폐기물이 있고, 비활성화 처분폐기물이 있습니다.

인벤토리에 작성할 때 몇 가지 전제가 필요합니다. 특히 분류기준에 대해서 우리가 가정해야 되는데, OPG(Ontario Power Generation)에 심지층 처분방식에서 제안된 폐기물 수용기준을 기준으로 중준위와 저준위 폐기물, 그리고 규제면제 폐기물을 분류를 합니다. 그리고 국제원자력기구(IAEA, International Atomic Energy Agency)가 권고하는 규제해제 준위를 준용하는데, 이것이 캐나다 규제에도 적용이 되고 있습니다.

그리고 B-25 컨테이너가 포장용기 표준으로 북미 쪽에서 많이 활용되고 있습니다. 그 다음에 운전 경험을 기반으로 여러 가지 포장 효율성을 고려합니다. 그다음에 오염되지 않은 재료는 가능하면 재활용합니다. 그리고 현실적으로 규제해제를 하는데, 현재 캐나다에서는 적극적으로 규제해제를 하지는 않고 있습니다.

4. 일반적인 CANDU 600 폐기물 재고

[그림 5]는 일반적인 폐기물 재고 목록인데, 314

Generic CANDU 600 Waste Inventory

Category	Packaged Volume (m3)	Mass (kg)
Intermediate Level Waste (ILW)	314	557,208
Low Level Waste (LLW)	2,360	2,517,309
Exempt Waste	5,650	10,043,643
Total Active Waste	8,324	13,118,160
Demolition Waste	231,632	413,344,212

[그림 5] 일반적인 CANDU 600 폐기물 재고

m³의 중준위 폐기물이 포장했을 때 발생합니다. 그 다음에 저준위 폐기물 같은 경우에는 2,360m³, 규제해제 폐기물 같은 경우에는 5,650m³ 정도인데, 현재 캐나다에서는 적극적으로 폐기물에 대해서는 규제해제를 추진하고 있지 않아 아마도 여기에서의 규제해제는 캐나다에서는 저준위 폐기물로 인식되고 있습니다. 또한 총활성화 폐기물은 8,324 m³, 총 비활성화 폐기물, 그러니까 철거 폐기물은 23만 1,632m³가 됩니다.

[그림 5] 우측에는 질량이 kg으로 나와 있습니다. 대부분의 철거 폐기물을 보면 거의 4억 1,300만kg인데, 이것들은 재활용이 가능하지만 현재 저희가 캐나다에서는 적극적으로 재활용을 추진하지 않고 있습니다. 그래서 저희가 이렇게 많이 있을 것으로 생각을 못 했는데, 산출 결과 상당히 양이 많으므로 재활용을 위해서는 규제해제 폐기물을 많이 늘려야 된다고 생각합니다.

결론

제가 말씀을 드렸다시피 314m³의 중준위 폐기

물이 발생이 된다고 말씀을 드렸는데, 칼란드리 아 해체에 대한 연구가 있었고, 피커링 누클리어 제너레이팅 스테이션 인포메이션 센터(Pickering NGS, Pickering Nuclear Generating Station Information Centre) 설계를 바탕으로 진행하였습니다. CANDU 600 설계와는 조금 다릅니다. 중준위 폐기물이 약 50% 정도 많아 450m³가 되는데, 발전소의 설계가 다르기 때문입니다. 저준위 폐기물에 대한 포장요건에 대해서도 더 많이 고려하였습니다. 면밀한 조사를 하였기 때문에 실제로는 지금 450m³보다는 조금 작아질 것으로 생각합니다.

최종 발언

활성화 또는 오염된 폐기물 규제해제의 기준 활성화도 더 낮을 것으로 생각합니다. 왜냐하면 지금 저준위 폐기물로 저희가 고려하고 있다고 말씀드렸는데, 그 규제해제 폐기물에 대해서는 지금 적극적으로 재활용을 하지 않고, 저준위 폐기물로 지금 처리를 하고 있습니다. 특성화 조사의 정확성에 많

은 것들이 달려있습니다. 물론 불확실성은 높지만 수량화할 수 없는 것들이 많이 있습니다.

물론 저희가 연구를 지속해야 될 것이고, 특성화 개선이 필요하다고 생각합니다. 왜냐하면 특성화 부분에 아직까지 저희가 취약점이 있기 때문에 개선할 필요가 있습니다. 그렇지만 아직까지 CANDU 노형 중에 완벽하게 해체가 완료된 것이 없으므로, 우리가 활용할 수 있는 운전경험이 없습니다.

제가 한 가지 더 강조해서 말씀을 드리겠는데, 지금 30년으로 지연된 기간을 상정하고 있습니다. 물론 지연해체기간이 짧아질 수도 있습니다. 특히 중준위 폐기물량이 지금 상당히 높는데, 10년 이후에 중준위 폐기물이었던 것이 30년 이후에는 저준위 폐기물이 됩니다. 그렇기 때문에 저희가 이런 연구를 다시 해서 10년의 지연해체기간을 상정하고, 이 특성화 조사를 다시 하는 것을 목표로 하고 있습니다.

경청해주셔서 감사합니다. 오늘 포럼도 성공적으로 개최하시기를 바랍니다. 감사합니다. **KMIF**