

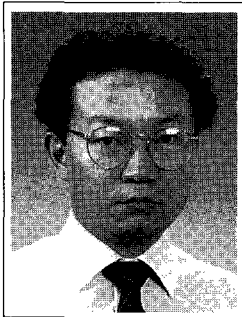
D2R2

Depense-in-Depth Reactor

자연과 공학을 이용한 심층 방어 원자로 기술

서 균 렬

서울대학교 원자핵공학과 교수



우 리 나라에서는 78년 4월 29일 최초로 고리 1호기가 상업 운전을 시작한 이후 현재에는 울진 3호기까지 14기의 원전이 운전중이며 98년 8월 산업자원부의 「장기전력수급계획」에 의하면 2015년까지 총 28기의 원전을 건설·운영할 계획이다.

표준 원전인 울진 3·4호기는 95%의 기술 자립화를 이룩하였다. 그러나 설계 기술의 축적은 기술 도

입 단계를 거치면서 쉽고 경제적인 소프트웨어 측면에 거의 편중이 되어 왔기에 완전 설계 자립에 대해서는 많은 논란이 있어 왔다.

기술 개발의 필요성

특히 새로운 개념의 차세대 원전에서 독자적 설계와 국내 원전의 해외 수출을 궁극적 목적으로 하고 있는 현재 가장 크게 대두되고 있는 것은, 첫 번째로 독자적 안전성 평가 능력과 두 번째로는 계통 성능 및 신기술 성능 검증 기술이다.

이 두 분야에 대해 국내에서도 많은 연구가 진행되어 왔으나, 우리나라 원자력 산업의 규모에 비해 실험 연구에 상대적으로 적은 투자로 인해 독자적인 기초 자료 및 실험 데이터를 생산하지 못하고, 대부분의 기술을 외국으로부터 수입하거나 이전 받는 데 크게 의존하여 왔다.

원전 기술의 자립화와 더불어 국산 원전에 대한 안전성 제고와 평가 기술을 확보하고, 또한 새로운 안전 개념의 도입시 요구되는 설계 검증을 위해서는 종합적인 열수력 안전성 실험 체계의 구축이 꼭 필요하다.

궁극적으로 원전 기술의 자립을 통해서 원전의 안전성 및 경제성을 향상시킬 수 있을 뿐만 아니라, 원전의 안전성에 대한 국민의 신뢰를 확보할 수 있을 것이다.

이와 더불어 독자적인 실험 체계의 구축을 통하여 상호 호혜주의 원칙에 따라서 국가간의 보유 기술 및 실험 결과의 상호 교환을 편리하게 함으로써, 대등한 위치에서 다양한 국제 공동 연구 프로그램에 참여가 가능하고 할 수 있다.

즉 국내의 제한된 인력과 재원 조건하에서도 최소한의 투자로 단기간 내에 선진국 수준의 기술 확보를 가능하게 할 수 있으며, 궁극적으로 국

내의 원자력 기술 분야의 선진화에 크게 기여할 것이다.

국내에서는 원전 설계 기술 자립 과정에서 눈에 보이는 설계 기술 확보에만 전력을 다하였을 뿐, 그 설계 기술의 응용·보완을 위해 가장 필수적인 종합적 안전성 실증 실험에 대한 관심은 전혀 기울이지 못하였다(표 1). 그러다 보니 날로 발전하는 원전 설계 기술에 우리 기술이 새롭게 도입되지 못하고 또다시 기술의 낙후가 예상되고 있다(표 2).

심층 방어 원자로(D2R2) 기술

진정한 의미에서의 원전 설계 기술의 자립 및 고유화, 그리고 안전성과 경제성을 고려한 새로운 경수로의 개발을 통한 국내외 시장 경쟁력 확보를 위해서는 자연과 공학이 조화를 이룬 한국 고유의 단순 집적형 비상 노심 냉각 계통의 개발이 우선적으로 필요하다.

〈그림 1〉에 개략적으로 도시된 심층 방어 원자로 D2R2(Defense-in-Depth Reactor) 기술은 원전의 안전성뿐만 아니라 경제성 향상 측면에서 원전의 피동 계통 적용 기술, 신뢰도 분석 기술, 원자로 운전 및 제어 기술, 사고 관리 기술, 독자적인 전산 코드 개발 기술 등을 망라하는 원전 안전 관리 기술 분야에서 핵심이 되는 기술이다.

집적형 비상 노심 냉각 계통 기술

〈표 1〉 국내외 원자로 안전 기술 현황

구분	기술 동향	기술 수준	비고
선진국	<ul style="list-style-type: none"> 열수력 종합 실증 실험 체계 구축 독자적인 전산 코드 개발/개선 사고 관리 기술 개발 구축 새로운 원자로 개발을 위한 실증 실험 기술은 자국의 독자적인 설계 기술 및 실증 실험 결과 이용 	<ul style="list-style-type: none"> 독자적인 실험 시설 보유 및 실험 수행 능력 확보 실증 실험 결과를 이용한 전산 코드 개발 능력 확보 국가별 고유의 사고 관리 체계 수립 코드 예측 능력, 불확실성 정량화 및 모델 개선의 주력 	<ul style="list-style-type: none"> 독자적인 실증 실험 체계 구축 및 전산 코드 평가/검증 능력 확보
한국	<ul style="list-style-type: none"> 확보된 설계 기술의 고유화 착수 새로운 원자로 개발 추진 독자적인 전산 코드 개발 추진 	<ul style="list-style-type: none"> 기술 도입을 통한 설계 기술 자립화 추진 일부 실험 장치 및 실험 기술 확보 사고 관리 체계 수립 필요 종합적인 실증 실험 체계 전무 	<ul style="list-style-type: none"> 종합적인 실증 실험 체계 구축을 통한 독자적인 전산 코드 개발 및 검증 능력 확보 필요

〈표 2〉 국외 원자로 설계 기술 현황

구분	원자로 개발 현황	코드 개발 및 실증 실험 현황
미국	<ul style="list-style-type: none"> 기존 원자로에 대한 독자적인 안전 해석 체계 및 안전성 평가 체제 확립, 사고 관리 기술 개발 완료 개량형 원자로(AP600·SBWR 등) 개발을 위한 종합적인 실증 실험 수행 및 안전 해석 체계 구축 노력 	<ul style="list-style-type: none"> 최적 계통 분석 코드 개발 및 불확실성 정량화를 위한 실증 실험의 지속적인 수행 개량형 원자로용 설계 코드 개발 및 안전성 검증을 위해 새로운 실증 실험 체계 구축
프랑스	<ul style="list-style-type: none"> 원자로 설계 기술 자립 완료 독자적인 안전성 평가 체제 확립 및 사고 관리 기술의 개발 새로운 원자로(N4·EPR 등) 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 독자적인 코드(CATHARE·FLICA) 개발을 위한 대규모 실험 시설(BETHSY 등) 구축 및 운용
독일	<ul style="list-style-type: none"> 원자로 설계 기술 자립 완료 독자적인 안전성 평가 체제 확립 및 사고 관리 기술의 개발 새로운 원자로(EPR) 개발 	<ul style="list-style-type: none"> 독자적인 코드(DRUFAN·ATHLET) 개발을 위한 안전성 실증 실험 장치(PKL·UPTF 등) 구축, 운용
일본	<ul style="list-style-type: none"> 원자로 설계 기술 자립 완료 독자적인 기술 개발 진행 새로운 원자로(APWR·JPSR 등) 설계 기술 개발 진행 	<ul style="list-style-type: none"> 외국에서 코드(JTRAC·REFLA/TRAC 등)를 도입, 개선하고 이를 위한 대형 실험 시설(LSTF·CCTF·SCTF 등) 운용 개량형 원자로 개발을 위한 새로운 실증 실험 수행

은 피동과 기동형 안전 주입을 원자로 내외로 적절히 실행함으로써 명실공히 기존의 설계 기준 사고와 노심용융 사고를 연속적으로 예방·완화하여 발생 가능 사고를 원자로 1차 계통에 원천적으로 억류하는 혁신적인 아이디어로 출발하였다.

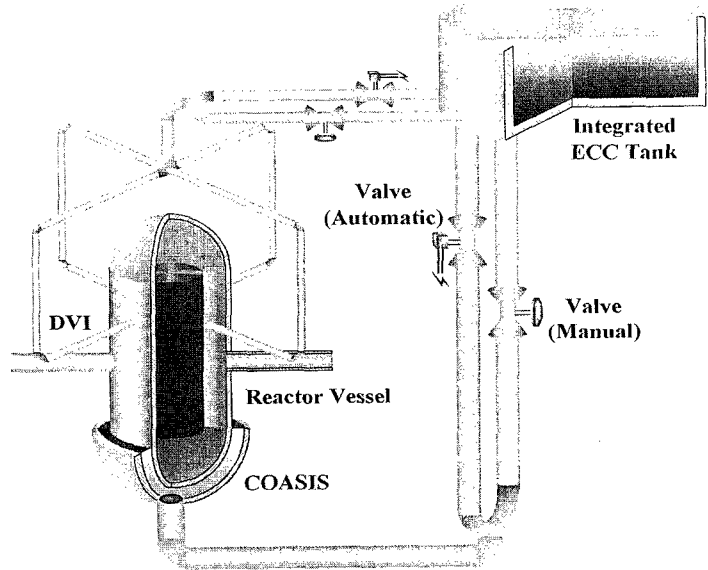
이러한 원자로 심층 방어 기술이 실증을 거쳐 상용화되면 기존의 격납건물에 의존하던 중대 사고 대처 방안에도 일대 단순화를 꾀하고, 대민 홍보 차원에서도 훨씬 설득력 있는 국산 원전 개발에 기여할 것이다.

신개념 비상 노심 냉각 기술인 D2R2 기술은 <그림 2>에 도시한 바, 설계 기준 사고로부터 중대 사고까지 하나의 종합 실험 설비 HITEC (High Temperature Engineering Complex)를 구축하여 차세기 경수로 생존을 겨냥한 심층 방어 원자로 개발을 최종 목표로 하고 있다.

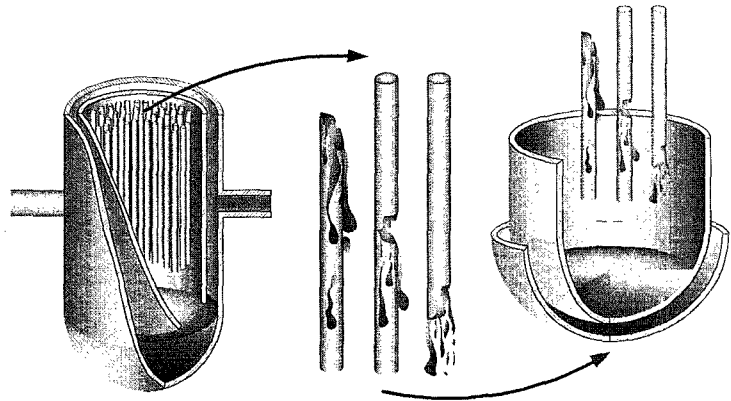
여기에서 생산되는 데이터를 이용하여 신형 원자로의 개발에 필수적인 안전성 평가 및 검증 기술을 확보할 수 있게 된다.

또한 원전의 설계나 운전 등에서 불필요한 보수성을 제거하여 경제성을 향상시킬 뿐만 아니라, 규제 요건의 최적화로부터 효율적인 안전성의 확보를 가능하게 할 것이다.

지난 20년간 미국 TMI와 우크라이나 체르노빌 원전 사고 등을 통하여 사회적으로 원자력의 안전성에 대한 일반 대중의 의구심이 증폭됨에



<그림 1> 심층 방어 원자로 - D2R2



<그림 2> 원자로심 용융 사고 종합 실험 설비 - HITEC

따라 원전에 대한 신뢰성의 확보는 현재 각국의 원자력 분야의 중점 과제로 추진되고 있으며, 외국의 경우 중대 사고 정책 및 안전성 목표 설정 등 국가적인 원자력 정책 수립을 위한 다각적인 노력을 하고 있다.

국내의 경우도 가동중 원전뿐만 아니라 새로이 건설될 차세대 원전 등

의 안전성을 입증할 수 있는 체계적인 노력이 이루어져야 한다.

국내에서 최초로 제안된 D2R2 기술을 개발하기 위한 종합 실증 실험은 상당 부분 원자력의 안전성에 대한 대중의 의구심을 줄이고 신뢰를 확보하는 데 기여할 것이다.

지금까지의 연구 개발 실적

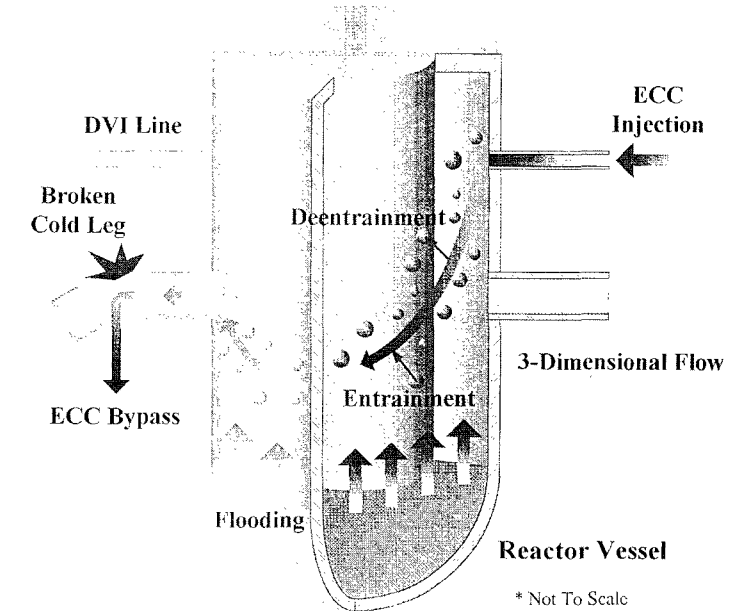
80년대 중반 이후 활발히 진행되어 왔던 설계 기술의 자립화 계획에 따라 선진국으로부터 설계 코드를 도입하여 활용하는 데 전력을 기울여 왔던 우리나라는 도입된 설계 코드에 내재된 핵심 기술 내용을 이해하거나, 또는 개선하기 위해 필요한 실증 실험적 연구에는 그 동안 소홀해 왔다.

그러나 92년 원자력 중장기 과제 착수 이후 이전의 국내 열수력 실험 현황을 살펴보면, 국내의 대학에서 수행되어 왔던 소형 실험 이외에는 한국원자력연구소에서 수행한 핵연료 개발을 위한 열유동 실험이 대부분이었고, 이를 통해 상온 및 저압의 조건에서의 열수력 실험 기반 및 측정 기술을 상당 부분 확보하였다.

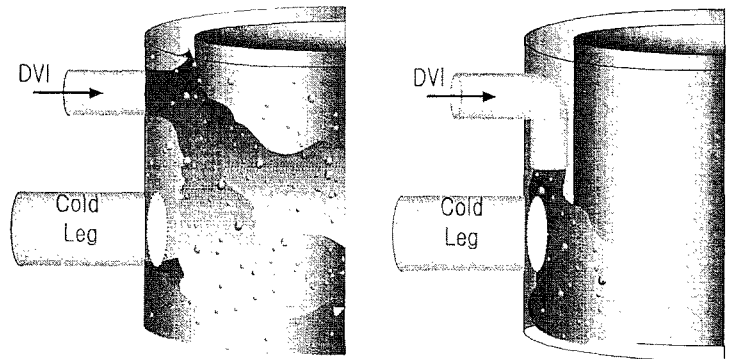
또한 실물대의 핵연료를 원자로 운전 조건과 동일한 열수력 조건에서 성능을 시험할 수 있는 노의 실증 장치(PWR 및 CANDU형)를 확보하였으며, 관련 고온·고압 시험 기술을 개발해 왔다.

또한 핵연료의 임계 열유속(CHF) 실험용 실험 장치 및 일부 신안전 설계 개념의 개발을 위한 실험 장치를 확보하여 실험을 수행중에 있다.

특히 국내 대학으로서는 처음으로 서울대에서 영광 3·4호기를 1/1000 부피비로 축소시킨 모형 원자로 증기 발생 계통을 제작하여 자연순환, 고온관 파손 사고 등 일부 원전



〈그림 3〉 파단 사고시 원자로 열유동 실험 - VISION



〈그림 4〉 원자로심 비상 냉각수 수평 및 수직 주입 방식

사고 모사 실험을 수행하였다.

그러나 실질적인 설계 자립화 및 신개념 원전의 개발을 위해서는 이와 같이 축적된 일부 실증 실험 기술을 바탕으로 해서, 좀 더 체계적인 실증 실험이 수행되어야 한다.

열수력 안전 측면에서는 비상 노심

냉각수의 원자로 직접 주입 DVI (Direct Vessel Injection)과 같은 연구가 〈그림 3〉에 도시된 VISION (Vessel Injection System Using Ion) 실험 장치 등에서 수행중이다.

이 실험에서는 냉각재 상실 사고시 파단 부위를 통한 비상 노심 냉각수

누출(Bypass)을 최소화하기 위한 여러 가지 주입 방식이 시험되고 있다(그림 4).

DVI의 강수관 내에서의 열수력학적 현상은 3차원 특성이 지배적인 관계로 종래의 저온관 주입 방식과 상이할 것으로 판단되고 있다.

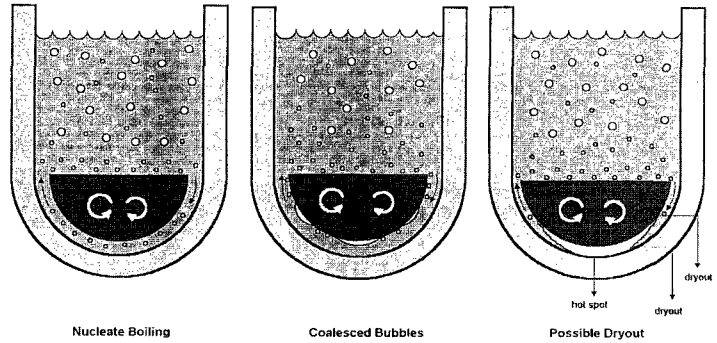
안전 주입수가 DVI관을 통해 강수관으로 직접 주입되기 때문에 이들은 강수관 내벽에 부딪치면서 액적들을 만들게 된다.

이 액적들은 노 내의 고압에 의해 파단 부위로 노 내에 있던 수증기와 함께 나가게 되고 비상 노심 냉각수의 주입은 액적 생성과 노 내외간의 기압차에 의해서 발생하여 노 내를 횡단하는 3차원 유동을 유발하게 된다.

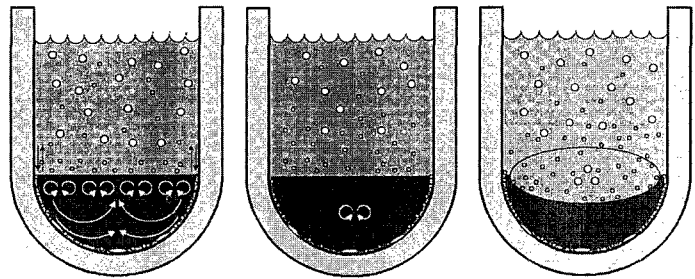
이러한 유동의 해석은 기존의 1차원 코드들로서는 한계가 있으며, 비록 비상 노심 냉각수의 우회에 대한 모델을 갖고 있는 코드라 할지라도 DVI에 대해 정확히 예측 가능할 것 인지는 의문이다.

또 3차원 코드들은 DVI에 대한 열수력 현상을 원자로 용기 부분에 대해서는 잘 예측할 수 있으나 계통 전체에 대한 해석은 거의 불가능하므로 코드에 필요한 여러 입력 조건들이 불명확한 한계성을 가지고 있다.

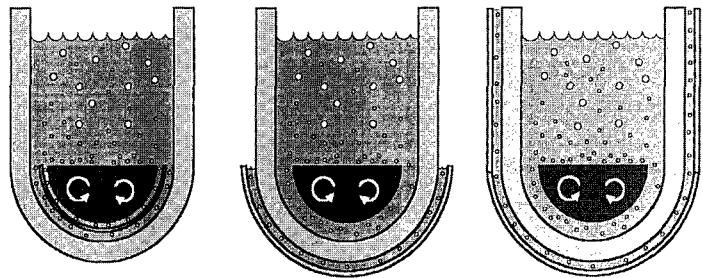
따라서 DVI를 통해 비상 노심 냉각수가 주입되는 경우에 대한 열수력 현상을 파악하는 것이 중요한 의미를 가지며 또한 이들은 코드의 성능 평가와 개선에 필요한 자료이다.



〈그림 5〉 헬소 간극 내 자연 냉각 메커니즘 모사 실험 - SONATA



〈그림 6〉 기타 원자로 내벽 냉각 메커니즘 - SONATA



〈그림 7〉 헬소 간극 내 인공 냉각 메커니즘 모사 - COASIS

TMI-2 사고 이전까지는 용융물이 원자로 용기에 떨어지는 상황까지는 예측하지 못하였고 사고 대응 조치도 그 전단계까지만 되어있었기에 사고 당시 원자로 용기가 녹아 내릴 것이라 예측하였으나 결과적으로 원자로

용기 파손까지는 도달하지 않았다. 이를 계기로 하여 원자로심 용융물이 원자로 용기에 쌓이게 될 때 과연 원자로의 건전성이 확보될 수 있을지에 대한 연구가 이루어졌다. 이제까지 이에 대한 연구는 대부분

원자로 내 자연 냉각이라 하여 용융물이 용기에 쌓이게 될 경우 노내 냉각 메커니즘은 어떻게 될 것인지, 그리고 그 상황에 대해 어떤 조치를 취하여 원자로 용기의 파손을 막을 것인지에 초점을 맞춰왔다.

이러한 연구 중의 하나가 한국원자력연구소가 수행하고있는 SONATA-IV(Simulation of Naturally Arrested Thermal Attack in Vessel)로서 원자로 용기와 노심 용융물 사이에 존재할 수 있는 간극을 통하여 붕괴열이 제거됨으로써 원자로 용기의 용융을 막을 수 있다는 이론이다.

실제로 TMI-2 사고 해석에서는 이 이론이 상당한 타당성을 인정받고 있다.

현재까지는 상사 물질을 이용한 중형 개별 효과 실험의 형태로 여러 가지 자연적 냉각 기능에 관한 실험을 진행하고 있다(그림 5)(그림 6).

차후에는 노심 용융물과 원자로 용기 내벽에 형성되는 미세 간극에서 일어나는 대단히 효과적인 열 제거 메커니즘에 관한 연구를 압력 용기 안에서 실제 UO_2 연료를 녹여 수행할 예정이다.

TMI-2 사고에서 약 20톤의 용융물이 원자로 용기 하부에 흘러내린 반면, 추후에 더 많은 양의 용융물이 흘러내리는 사고가 발생한다면 SONATA-IV에서 제기된 이론에 의한 열 제거량은 충분하지 못하여 원자로 용기가 녹아내릴 수도 있다.

이에 대비하여 근간에 이루어지고 있는 연구가 노외 냉각으로서 이는 원자로 용기를 사고시 추가적으로 외부에서 냉각시켜 주어 원자로 용기의 온도 상승을 막아주는 것이다.

COASIS(Corium Attack Syndrome Immunization Structure) 프로젝트에서는 공학 설비를 이용한 원자로 용기 내외벽 냉각 실험을 부분적으로 수행하고 있다(그림 7).

COASIS 개념은 원자로 용기 외부에 새로운 구조물을 설치하여 용융물이 원자로 하부에 쌓이는 사고가 발생할 때 냉각수를 구조물의 하부 혹은 추가적으로 측면에서 주입시켜줌으로써 고온 용융물에 의한 원자로 용기의 온도 상승을 막아주는 것이다.

반면에 D2R2 기술과 같이 집적된 비상 노심 냉각 계통에 대해 설계 기준 사고에서 중대 사고까지 종합적으로 실증하는 실험은 아직 국내외에서 이루어지지 않았다.

그 주된 이유는 기술 선진국의 예를 살펴볼 때 70~80년대의 비상 노심 냉각에 관한 열수력 연구와 80년대의 노심 용융 중대 사고 연구가 시간·공간·인적 자원 측면에서 제각기 이루어졌기 때문이다.

반면 국내에서는 소규모 개별 실험의 형태로 일정 부분은 수행중이거나 기수행되었으나 아직도 핵심적인 실증 실험은 국내에 전무한 상태이며, 개별 실험의 형태는 선진국에 비해서 전반적으로 뒤진 수준에 머물러 있어

계속적으로 과감한 투자가 요구되는 시점에 있다.

앞으로의 전망

D2R2 기술은 한국 표준형 원자로와 특히 차세대 원자로의 안전성 증진과 밀접하게 연결이 되어 국내 원자력 산업에 미칠 부대 효과가 클 것으로 기대된다.

D2R2 기술은 원전 설계 핵심 전산 코드의 국산화에 필수적인 실험 및 설계 자료를 공급하고, 원전 핵심 기술 소유로 원전 산업의 국제적 경쟁력을 강화하여 향후 아시아 원전 시장의 선도국 역할에 대비하는 데에도 기여할 것이다.

향후 D2R2 기술 개발은 단계적으로 차세대 원자로에 적용될 수 있으며, 안전성과 경제성이 증진된 차세대 원자로 기술의 수출 산업화에 기여할 것으로 예상된다.

오는 2000년대 정부 차원에서 공급이 안정된 기술 집약적 에너지이고, 기후변화협약의 감축 대상인 온실 가스를 방출하지 않는 환경 친화적 에너지로서, 다양한 파급 효과를 지닌 원자력을 주종 전력원으로서 확대 이용하고 수출 산업으로 육성하는 과정에서, D2R2 연구는 원자력 안전 관리 기술 수요에 부응하는 한국 고유의 하드웨어 및 소프트웨어 개발 및 독자적 기술 축적에 일대 전기를 마련할 것으로 기대된다. ☞