

소형모듈원전(SMR)의 도전과제와 국내외 동향

이 정 익 KAIST 원자력 및 양자공학과 교수



1. 대형원전 vs. 소형모듈원전(Small Modular Reactor: SMR)

백만 킬로와트(kW) 이상의 전력을 생산하는 대형 원자력 발전소는 연료를 전기로 바꾸는 발전소 중에서는 단일규모로 가장 크다. 원자력 발전소의 대형화는 규모의 경제를 통해 전력 생산의 경제성을 높인데 주안점을 두었기 때문에 이루어졌다. 즉, 시장 논리에 의해서 원자력 발전소는 대형화를 거듭하였으며, 산업화가 고도화됨에 따라서 폭발적으로 증가하는 전력수요를 감당하기 위해 최적화되어 왔다. 대형 원자력 발전소는 앞으로 우리나라의 제조업 중심의 산업구조가 유지되는 동안에는 경제성 측면에서 경쟁력이 유지될 것이다. 특히 우리나라와 같이 화석연료 및 신재생에너지 자원이 열악하며 중공업을 비롯한 대형 제조업의 산업 비중이 높은 지역에서는 원자력 발전은 경제성이 높은 발전 방식이다.

기후 위기가 전 세계적인 문제로 인식되고 이를 해결하기 위해서 화석연료의 사용을 급격하게 줄이려면 에너지는 더 이상 시장의 논리만이 아닌 시장 외적인 정책이나 규제 등에 의해서 변화해 나갈 것이다. 급변하는 시장환경 속에서 대형 원자력 발전은 비록 발전 중에 탄소배출을 하지 않지만 방사성폐기물 처리, 안전성 유지 및 강화, 그리고 급격하게 비중이 늘어나는 재생에너지와의 연계성 등의 측면에서 지속적으로 개선해 나가야 할 것이다.

소형모듈원전(Small Modular Reactor: SMR)은 원자력 산업계가 이렇게 급변하는 시장 환경에서 대형 원자력 발전소라는 단일 선택지를 벗어나 더 유연하게 대처할 수 있게 해준다. 경제성장, 기후 위기, 에너지 안보, 공급 안정성 등의 복합적인 에너지 문제를 해결하는 측면에서 SMR은 대형원전과 다른 각도에서 중요한 역할을 수행할 수 있기 때문이다. 더 나아가서 SMR은 단순히 에너지 시장에서 전력공급 역할만 담당하는 것이 아니라 수소생산, 해양산업, 우주산업 등과의 연계와 결합을 통해서 다양한 산업계가 원자력 에너지를 더 직접적으로 이용할 수 있게 하는 기회를 제공할 수 있다. 본 원고에서는 SMR의 특성 및 이 특성을 구현하기 위한 기술개발 도전과제에 대해서 먼저 설명하고, 현재 전 세계적으로 이루어지는 SMR 개발과 이로부터의 시사점 등에 대해서 다루고자 한다.

2. SMR의 특징

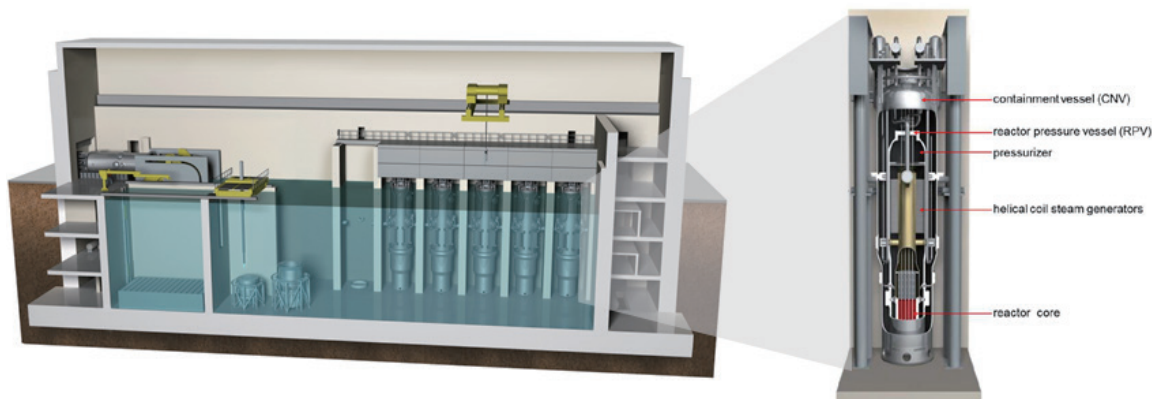
세계 각국에서는 70여종 이상의 SMR들이 현재 개발 중이다. SMR 기술은 기존 수냉식 대형원전을 물리적으로 축소한 3세대 기반의 기술부터 차세대 원전 기술인 4세대 원전 기술이 적용된 원자로를 모두 아우른다. 원자로의 종류가 이렇게 다양한 이유는 핵반응을 일으키는 중성자의 에너지에 따라서 핵반응의 다른 성질을 이용할 수 있기 때문이다. 낮은 에너지의 중성자는 낮은 농축도의 핵연료를 사용할 수 있지만 사용 후핵연료 발생량이 기존의 대형원전과 유사한 수준으로 발생하는 문제점을 가진다. 높은 에너지의 중성자를 이용하면 사용 후핵연료 발생량이 줄어드는 장점이 있지만 높은 농축도의 핵연료를 이용하여 해서 경제성이 낮아질 수 있다. 기존의 대형원전은 저농축 핵연료와 낮은 에너지의 중성자를 이용하는 원자로들이 대부분이었으며 냉각재는 주로 물을 사용했다. 하지만, 변화하는 환경에서 원자로에 더 중요하게 요구되는 특성에 따라 핵반응의 다른 성질을 이용하는 원자로가 필요해지며 이런 요구에 부응하여 다양한 종류의 SMR이 개발 중이다.

원자로를 냉각하는 냉각재 측면에서도 핵적특성, 상변화 온도, 재료와의 양립성 등에서 물보다 장점이 있는 다양한 유체가 검토되고 있다. 이런 냉각재 중 대다수는 과거에 비록 작은 규모에서 시도가 있었지만, 원자로의 대형화에는 실패하였던 냉각재들이다. 하지만 SMR이라는 새로운 환경에서 활용하면 장점이 생길 수 있어 물과 다른 냉각재가 시도되고 있다. 따라서 현재 세계 곳곳에서 개발되는 SMR들은 물 뿐만 아니라 용융염, 소듐, 납(비스무스), 헬륨 등 다양한 냉각재를 이용하려고 하며, 핵연료 농축도도 기존 원전보다 높이거나 산화우라늄이 아닌 금속우라늄 등의 다른 재료의 핵연료를 사용하려고 한다.

이렇게 다른 원자로 기술들이 사용되지만, SMR들은 제작 및 건설 방식의 개선, 전력공급 유연성 증진, 안전성 극대화를 통한 수요지 근처 발전, 운전 및 유지보수 필요인력 감소 등의 공통적인 지향점을 가진다. 이는 해외에서 대형원전이 건설 중 겪는 공급망의 한계, 대형 프로젝트의 잘못된 관리로 인한 공기 지연, 전력망 추가 건설의 어려움, 높아지는 안전에 대한 요구, 신재생에너지 연계 등에 해결책으로 SMR이 활용되기 위해서이다. 다행히도 우리나라에서는 위에서 언급한 문제 중 몇몇은 대형원전의 지속적인 건설을 통해서 겪지 않았다. 하지만, 선진국에서 원자력 발전을 지속해서 이용하거나 앞으로 확대하기 위해서는 변화가 필요하다.

하지만 기존 대형원전에 비해서 SMR은 단일 발전소의 발전 용량이 작아서 기존의 원자력 발전 산업과 함께 진행이 된다면 규모의 경제원리를 극복할 수 없어 전력 생산 단가가 높을 수밖에 없다. 따라서 기존의 대형원전에서 이루어지는 제작, 건설, 유지보수, 운영 등의 모든 과정에서 패러다임이 바뀌지 않는다면 SMR 사업이 성공하기는 어렵다. 이런 연유로 SMR 개발사업은 전통적으로 원자력 발전소를 설계하던 기업들보다는 벤처로부터 출발하여 전통적인 기업들이 시도하지 못한 방식으로 원자로 개념을 설정하고 설계를 혁신하고 있다. 물론 혁신적인 원자로 기술은 안전성 측면에서 검증받아야 하는 어려움이 있고, 인허가 과정에 기인하는 불확실성으로 인해서 사업의 불확실성도 있다. 하지만, 미국에서는 NuScale과 같은 SMR은 혁신적인 설계를 제시하여 이에 대해서 보수적인 규제기관조차 안전성을 이미 인증하는 상황까지 연출하고 있다.

그림 1 NuScale SMR 개념도



자료: 에너지경제연구원 2021.10.22 『세계원전시장 인사이트』, p.6. 그림 재인용

3. SMR 개발의 도전과제

SMR은 안전성, 운영성, 제작 및 건설성 측면에서 대형원전 대비 혁신적인 기술개발 및 도입이 필요하다. 하지만 SMR 개발자에게는 혁신적인 기술뿐만 아니라 혁신적인 기술을 인증해줄 수 있는 규제환경 변화도 절실하다. 즉, 개발자와 규제기관 사이에 새로운 역학관계 정립이 SMR 개발의 중대한 도전과제 중 하나이다.

SMR의 안전성 측면에서는 원자력 발전소의 방사선 비상계획구역(Emergency Planning Zone: EPZ) 축소에 대해서 우선 언급할 필요가 있다. 우리나라를 비롯한 대형 원자력 발전소를 운영하는 대다수 국가에서는 원자력 발전소 반경 10에서 30km까지 이르는 주변 지역을 EPZ로 지정하고 주기적인 훈련 및 관련 시설 등을 확보해야 한다. 하지만 전력망 증설 등의 한계를 극복하기 위해 수요지 근처에서 SMR이 발전하기 위해서는 발전 용량에 상관없이 지정되는 기존의 EPZ 설정 방식에 대한 변화가 필요하다. 이런 변화를 유도하기 위해서는 SMR의 혁신적인 안전성을 우선 기술적으로 입증해야 한다. 또한, SMR 개발사업을 촉진하기 위해서 SMR을 유치하는 국가의 규제방식에 대한 변화도 함께 하여야 한다.

일례로 미국은 기존의 원자력 발전소 규제를 규정적 규제(Prescriptive regulation)에서 이미 10여 년 전부터 성능기반 규제(Performance-based regulation)로 변화하고 있다. 규정적 규제는 설계된 계통과 기기가 달성해야 할 성능과 요건을 세세하게 규정하여 그 요건을 만족하는지 판정을 통해서 규제하는 방식이다. 규정적 규제를 하게 되면, 기존에 이미 운영 중인 대형원전과 유사한 원전을 설계 및 건설할 때는 사업자가 만족해야 하는 요건이 명확하여 사업의 불확실성이 낮아져 규제가 효율적으로 작동한다. 하지만 SMR과 같이 기존의 원전과 다른 기술이 적용되고 대형원전과 다른 혁신적인 안전 기술을 사용한다면 규정적 규제는 한계를 보이며 사업자에게는 혁신 기술 도입의 방해요인으로 규제가 작동할 수 있다. 즉, 규정적 규제환경에서는 EPZ가 발전소 용량이나 안전성과 이를 구현하는 기술과 무관하게 설정되어 있어서 사업자는 혁신 기술개발의 보상이 없다.

이를 문제점으로 인식한 미국은 성능기반 규제를 도입하여 SMR 사업의 불확실성을 낮추고 사업자의 혁신 기술 도입을 더 장려하면서 더 효율적으로 혁신 기술에 대한 규제가 가능하게 하고 있다. 성능기반 규제는 계통과 기기가 달성해야 하는 성능만을 규제하며 그 성능을 달성하기 위한 설계 요건과 사용되는 기술은 사업자에게 맡겨서 사업자가 규제기관에 성능을 달성하는 것을 증명하는 방식이다. 따라서, 사업자는 혁신적인 안전 기술 도입으로 EPZ가 축소되어도 주변 지역에 미치는 영향이 같거나 더 안전할 수 있음을 입증한다면 성능기반 규제에서는 규제기관이 EPZ 축소를 허용할 수 있다. 현재 우리나라에서도 이와 관련된 논의가 활발하게 진행되어야 할 필요가 있으며 앞으로 국내에 SMR 도입을 심각하게 고려한다면 규제의 철학에 대한 고민도 필요할 것으로 보인다.

SMR 운영성 측면에서는 SMR의 운전, 유지보수, 보안 등에 대해서 모두 앞서 설명한 것과 같은 문제점이 있다. 만약 대형원전 한 호기를 운전하는 인원과 같은 인원이 SMR 한 호기를 운영해야 하는 규정을 적용한다면 SMR의 경제성은 심각한 문제를 겪게 된다. 대형원전은 운영 및 유지보수 인력의 인건비 비중이 전체 발전단가에서 차지하는 비중이 작다. 이는 대형원전 한 호기의 건설비가 많이 들면서 동시에 발전 용량도 크기 때문이다. 하지만 SMR은 한 호기의 건설비가 낮으면서 발전 용량도 적어서 만약 같은 수의 인력이 한 호

기를 운전하고 정비한다면, SMR 발전단가에서 인건비 비중이 높아져 경제성을 상실하게 된다. 따라서 이런 문제를 해결하기 위해서는 운전원 개입이 필요 없는 피동 안전설비 도입, 자동 및 자율 제어, 디지털트윈, 원격 제어 등의 혁신적인 기계와 전기·전자 기술 도입을 통해서 호기당 운전원 및 유지보수 인력의 부담을 낮추어야 한다. 또한 SMR의 신재생에너지와의 연계를 촉진하기 위해서 높은 부하추종 운전 능력을 보유해야 하며, 이 운전과정이 운전원 개입이 최소화된 자동화가 이루어져야 SMR의 안전성, 유연성, 운전성 등이 보장된다.

성공적인 사례로 미국에서 개발단계가 앞서 있는 NuScale의 경우 혁신적인 안전 기술을 도입하여 기존의 대형원전 한 호기를 관리하는 동일한 수의 인원이 NuScale 원자로 12기를 관리할 수 있음을 시뮬레이터 환경을 통해서 규제기관에 성공적으로 증명하였다. 이는 기존의 대형원전 인허가 과정에서 볼 수 없었던 혁신 기술을 도입한 또 다른 성공사례로 볼 수 있다. 또한 빌 게이츠가 설립한 TerraPower에서 개발하는 Natrium과 같은 원자로는 열에너지저장 시스템과 연계하여 운전이 되어 SMR의 유연성을 극대화하면서 안전성도 높이는 전략을 취하였다. 앞서 언급한 것과 같이 미국에서는 규정적 규제에서 성능기반 규제로 변화하며 운전원의 절대적인 숫자를 규제하는 것이 아니라 설계특성과 안전성에 따라 적정 운전원 및 유지보수 인력의 설정을 허용하기 때문에 이와 같은 혁신 기술 도입이 가능하다.

전통적으로 원자력 발전단가는 건설비가 크게 차지한다. 건설비가 크게 차지하는 요인 중의 하나는 다수의 고압용기와 주요 기기들이 공장에서 각각 제작되어서 현장으로 이송되어서 차례차례 설치되고 콘크리트 구조물을 이용하여 건설하는 과정을 거치기 때문이다. 하지만 SMR이 규모의 경제에서 벗어나 상업적으로 성공하기 위해서는 건설비를 낮추어야 하며, 이를 위해서는 건설 공기 단축과 현장 건설 업무 최소화를 위한 혁신 기술의 적용이 필요하다. SMR이 이런 전통적인 대형원전 건설 방식에서 벗어나기 위해서는 마치 공장에서 에어컨이 조립되듯이 대부분이 완성된 채로 출고하여 현장에서는 설치만 하는 방식으로 변화해야 함을 의미한다. 즉, SMR의 제작 및 건설 기술은 대형원전과 달라야 하며 공급망도 대형원전과 공유되지 않는 부분이 있어서, 새롭게 구성되어야 할 필요가 있음을 의미한다.

특히 이 부분에서 다수의 해외 SMR 개발자들이 조선·해양산업과의 융합을 고려하고 있다. 조선·해양산업에서는 이미 오래전부터 모듈별로 제작 후 조립을 통해서 대형선박을 건조하는 기술을 개발하여 이용하고 있다. SMR도 공장에서 기기를 모듈별로 제작 후 조립을 통해 완성하는 과정은 선박 건조 과정과 유사하겠지만, 대부분의 SMR은 육상을 통해서 전체 하나의 모듈을 이송하는 것이 운송로 측면에서 제한적이어서 SMR 보급의 큰 제약사항이 될 수 있다. 하지만 선박이나 부유체에 SMR을 탑재하는 방향으로 제작하고 최종 완성된 발전소를 수요지까지 이송할 수 있다면, SMR이 추구하는 제작 및 건설 기술 혁신 방향과 일치한다.

이런 배경에서 최근에 상당수의 해외 SMR 개발업체들은 국내 조선 산업체에 SMR 사업 참여 의향을 확인하고 있고 실제로 국내 조선 산업체의 SMR 사업 참여도 일부 확인된다. 또한 현재 러시아에서 이미 가동 중인 SMR인 KLT-40S를 탑재한 Akademik Lomonosov는 조선소에서 전체 원자력 발전소 건조가 완료되어서 수요지로 이송 후 성공적으로 주변 지역에 전력을 공급 중이다. 즉, 전통적인 대형원전 건설 방식에서 전혀 다른 방식으로 제작된 원자력 발전소가 이미 성공적으로 가동하고 있음을 의미하며, 이는 시사하는 바가 크다.

하지만 아직 원자력 산업계와 조선·해양산업이 서로의 차이점을 이해하는 과정이 더 필요한 것으로 보이며,



더 나아가서 조선·해양산업 측에서도 SMR 사업이 매력적이고 높은 부가가치를 창출할 수 있는 신사업이어야 한다. 즉, 단순히 SMR을 탑재하는 부유체 제작만으로는 조선·해양산업의 고부가가치 신산업이 되기는 힘들며, SMR 사업에 조선·해양산업의 기술을 활용하기 위해서는 유기적으로 조선·해양산업이 원자력 산업과 결합할 수 있는 방향을 고민할 필요가 있다.

4. SMR 국내외 동향

우리나라는 일찍이 SMART라는 10만 킬로와트급의 소형원자로를 개발하여 표준설계인증을 2012년에 받은 바가 있다. 하지만 국내 실증이 진행되지 않았고, 사우디아라비아와 공동개발 등을 통해 수출을 추진하였으나 현재 답보 상태이다. 하지만 대외 SMR 사업환경이 급변함에 따라 우리나라의 독자적인 SMR 노형이 다시 필요하게 되었으며, 국내에서는 현재 (주)한국수력원자력이 주도하는 산학연 컨소시엄이 2028년까지 표준설계인증을 국내 규제기관으로부터 받을 수 있게 i-SMR 개발이 진행되고 있다. i-SMR은 혁신 기술을 최대한 활용하여 원자력 발전소의 안전성, 경제성, 유연성 측면을 강화하여 기존의 대형원전이 진출하기 어려운 시장이나 국가에 진입을 우선 할 수 있게 한다. 빠른 개발 일정을 가지고 있어서 대형원전에 사용되는 가압경수로 기술에 기반을 두고 있으며, 현재까지 국내에서 독자적으로 개발된 대형원전과 소형원전에 적용될 수 있는 성공적인 원자력 안전 기술들을 최대한 활용할 계획이다. 하지만 앞선 절에서 설명한 도전과제를 함께 해결하면서 개발을 진행하여야 해서 우리나라 원자력계만이 아니라 규제, 정책 등 기술 외적인 영역에서도 많은 관심이 필요할 것으로 보인다.

미국에서는 SMR 개발 진척도 측면에서는 현재 NuScale이 가장 앞서 있다. 2020년에 미국 규제기관인 USNRC로부터 표준설계인증을 받았으며, 미국 서부지역의 전력공급을 비영리 기반으로 하는 Utah Associated Municipal Power Systems(UAMPS)라는 지역 공공기관의 자금을 이용하여 Idaho에 NuScale 발전소를 2026년까지 건설할 계획이다. 앞서 설명하였듯이 USNRC에서 표준설계인증 과정을 통해 NuScale은 대형원전보다 확연하게 축소된 EPZ와 호기당 운전인력으로도 안전성이 충분함을 입증하여서 혁신 기술 도입을 통한 안전성 확보가 경제성 확보로도 이어질 수 있는 성공사례를 만들었다. 또한 NuScale은 최근에 루마니아나 폴란드와 같은 국가에도 건설을 추진 중이며, 두산, GS, 삼성 등 국내대기업의 투자도 받은 상태이다.

미국에서는 또한 빌 게이츠가 설립한 TerraPower社가 GE社와 공동으로 개발하는 Natrium 원자로를 PacificCorp라는 발전사와 함께 와이오밍 주에 실증을 2028년까지 건설 완료를 목표로 진행 중이다. Natrium 원자로의 소듐냉각고속로 기술이 적용된 차세대 원자로이며 미국 정부의 Advanced Reactor Demonstration Program (ARDP)의 지원받아 진행되기 때문에 혁신 기술 개발과정에서의 불확실도를 낮추었다. 또한 Natrium 원자로의 열에너지 저장시스템과 연계하여 운전하기 때문에 원자로의 출력이 바로 전기 출력과 연동되지 않는 혁신적인 설계 및 운전 개념을 도입하였으며, 이 과정에서 Natrium 원자로의 안전성도 함께 증진되어서, 안전성과 유연성을 동시에 높이는 성공적인 기술개발 전략을 선보였다. 최근에는 국내의 SK그룹에서 TerraPower社에 투자하여 이와 같은 차세대 SMR 기술에 관심을 보였다.

SMR 개발 및 도입에 적극적인 다른 나라들로는 캐나다, 프랑스, 러시아, 중국 등이 있다. 캐나다는 Ontario Power Generation (OPG)라는 발전사가 GE社의 비등경수로 기반의 BWRX SMR을 선정하여 2028년까지 건설을 완료하겠다는 계획으로 현재 사업을 추진 중이다. 동시에 OPG社는 고온가스 원자로 기술 기반의 Micro Modular Reactor(MMR)라는 원자로를 USNC社로부터 공급받아 전력망이 독립된 캐나다의 일부 지역에서 전력공급이 가능하게끔 사업도 동시에 추진 중이다. USNC社의 MMR은 현재 현대엔지니어링과 한국원자력연구원에 함께 참여하여 개발 중이다. 프랑스의 EDF社는 NUWARD라는 가압경수로 기반의 SMR을 현재 2030년까지 건설 완료를 목표로 개발 중이다. 러시아는 앞서 설명하였듯이 이미 2019년 말에 해양 부유체에 탑재된 가압경수로 기반의 SMR인 KLT-40S를 이용하여 Pevek이라는 항구도시에 전력공급을 시작하였다. 중국도 러시아와 같은 가압경수로 기반의 SMR을 해양 부유체에 탑재하여 해상 이송이 가능한 원자력 발전소를 개발 중이며, 동시에 고온가스로 기술이 적용된 HTR-PM이라는 SMR은 2021년에 이미 전력망에 전력을 공급하기 시작하였다. 이 밖에도 국내의 삼성중공업은 덴마크의 Seaborg 회사와 협력하여 용융염 원자로 기반의 해양발전용 SMR 개발을 2022년부터 추진하기 시작하였다.

5. 시사점

인간이 사용하는 모든 에너지는 과학적으로 보면 핵에너지로부터 출발한다. 태양에너지는 핵융합에너지이기 때문에 태양에너지의 다른 형태인 화석연료, 풍력, 수력에너지도 모두 핵에너지가 출발점이다. 원자력은 말할 것도 없으며 지열조차 지구 내에서의 핵반응으로부터 발생한 열이 축적된 것이다. 이런 맥락에서 SMR은 에너지의 공통적인 출발점인 핵에너지를 직접적으로 이용하는 방식 중 하나이며 탄소중립이 중요한 가치가 될 미래 에너지 시장을 위한 기술이다. 지금까지 인류는 수백년간 가장 익숙한 유체인 물을 사용하는 원자로를 이용하여 핵에너지를 직접적으로 이용하였다. 여러 국가에서 SMR 개발을 추진하는 일정을 살펴보면 수냉식 원자로 기술을 이용하면 빠르면 이미 발전을 시작하였거나, 늦어도 2030년 전까지 건설을 시작하거나 완료할 계획을 하고 있다. 또한 일부 국가에서는 차세대 원자로 기술까지 도입하여 기존의 안전성 증진이 경제성을 저해하는 공식을 과감히 깨고, 안전성과 경제성 등을 동시에 증진할 수 있는 혁신 기술 도입을 추진 중이다. 우리나라는 현재 대형원전 설계, 제작, 건설 측면에서 높은 기술 경쟁력을 갖추고 있다. 하지만 변화하는 에너지 패러다임과 시장환경에 적응하기 위해서는 SMR 개발을 더 적극적으로 추진해야 할 것이다. 또한 성공적인 SMR 개발을 이용하여 경제적인 탄소중립을 달성하기 위해서는 원자력 업계만의 노력이 아니라 규제와 정책까지 아우르는 포괄적인 지원이 사회 각계각층으로부터 필요하다.