

기후리스크 포럼

기후변화시나리오 및 모델링

2022.05.31

박찬

(서울시립대학교 도시과학대학 조경학과)

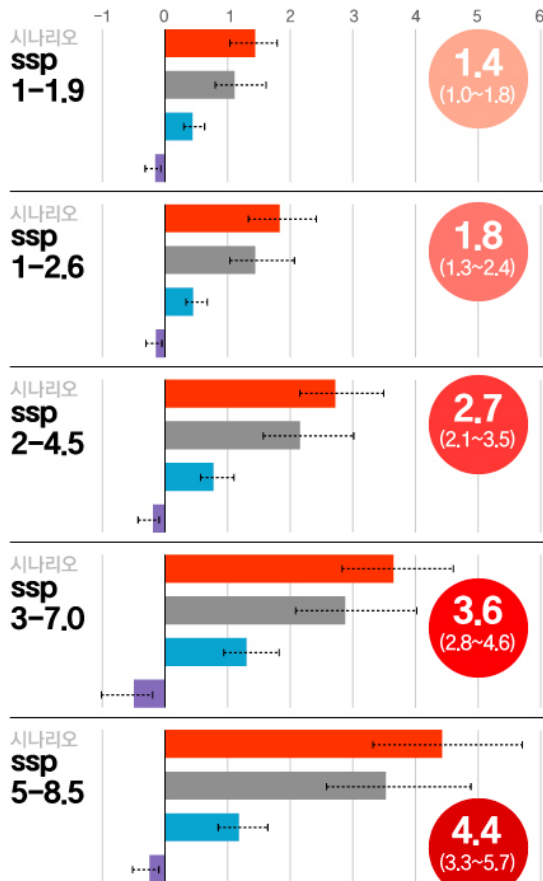
1. 기후위기와 기후탄력적 개발

기후위기와 기후시스템 반응

온실가스 배출 시나리오별 지구 평균기온 상승 전망치

단위: °C, 2081~2100

■ 최종 기온 상승 ■ 이산화탄소 기여도 ■ 비이산화탄소 온실가스 기여도 ■ 대기오염 산림흡수



자료: IPCC 6차 기후변화 평가보고서

The JoongAng

기온 상승에 따른 지구 기후시스템의 반응

1850~1900년 대비 기온 상승(°C)	+1.1 현재	+1.5	+2	+4
기온 10년 빈도 가장 더운 날 기온	+1.2°C (1.0~1.4)	+1.9°C (1.5~1.9)	+2.6°C (2.0~2.8)	+5.1°C (4.6~5.6)
가뭄 10년 빈도 가뭄 발생 증가	1.7배 (1.2~3.1)	2배 (1.4~4.1)	2.4배 (1.5~4.8)	4.1배 (2.0~8.2)
강수량 10년 빈도로 비가 많이 내린 날의 발생빈도 증가	1.3배 (1.3~1.4)	1.5배 (1.5~1.6)	1.7배 (1.7~1.9)	2.7배 (2.5~3.2)
눈 눈 덮임 면적의 변화	-1% (-2~0)	-5% (-5~-1)	-9% (-12~-4)	-25% (-31~-18)
열대 사이클론 열대 사이클론 강도의 증가율	-	+10%	+13%	+30%

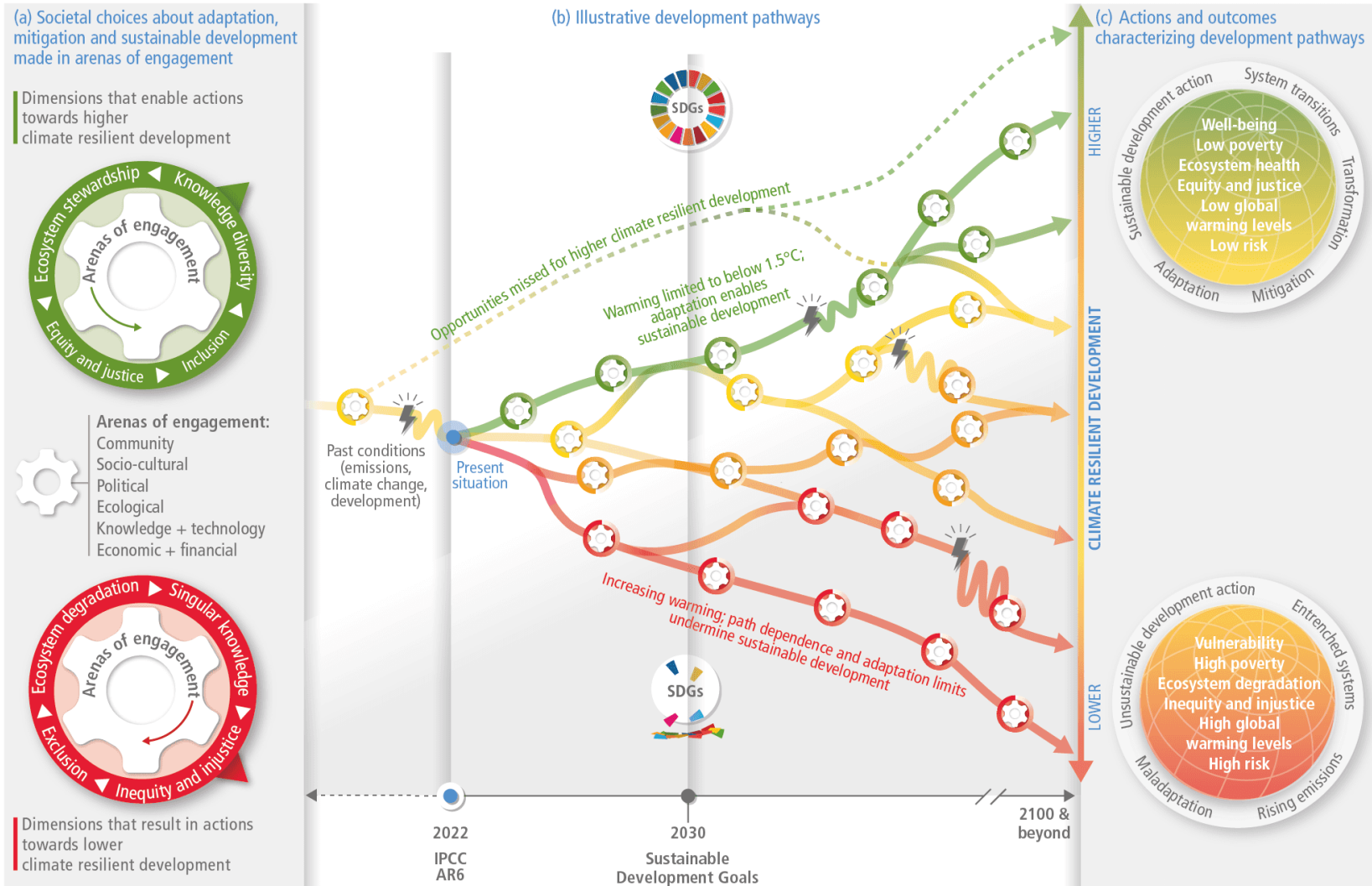
자료: IPCC 6차 기후변화 평가보고서

The JoongAng

1. 기후위기와 기후탄력적 개발

IPCC AR6에서의 기후탄력적 개발

There is a rapidly narrowing window of opportunity to enable climate resilient development

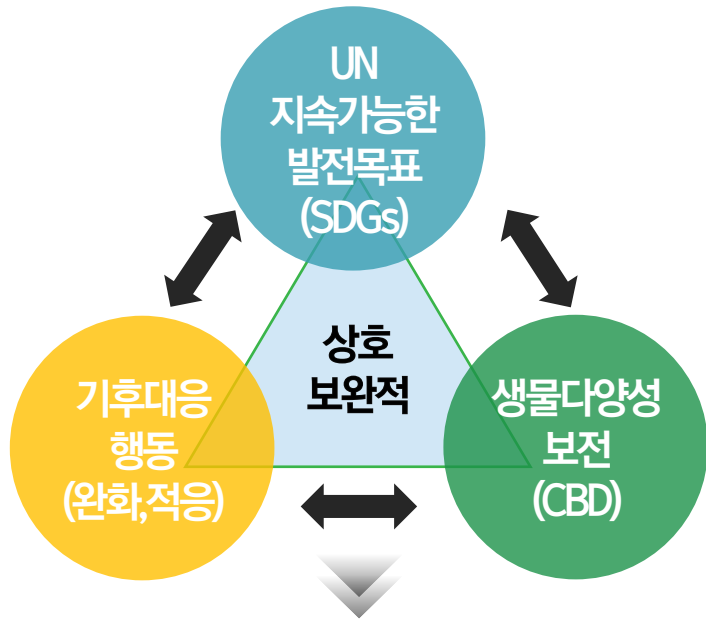


⚡ Illustrative climatic or non-climatic shock, e.g. COVID-19, drought or floods, that disrupts the development pathway

Narrowing window of opportunity for higher CRD

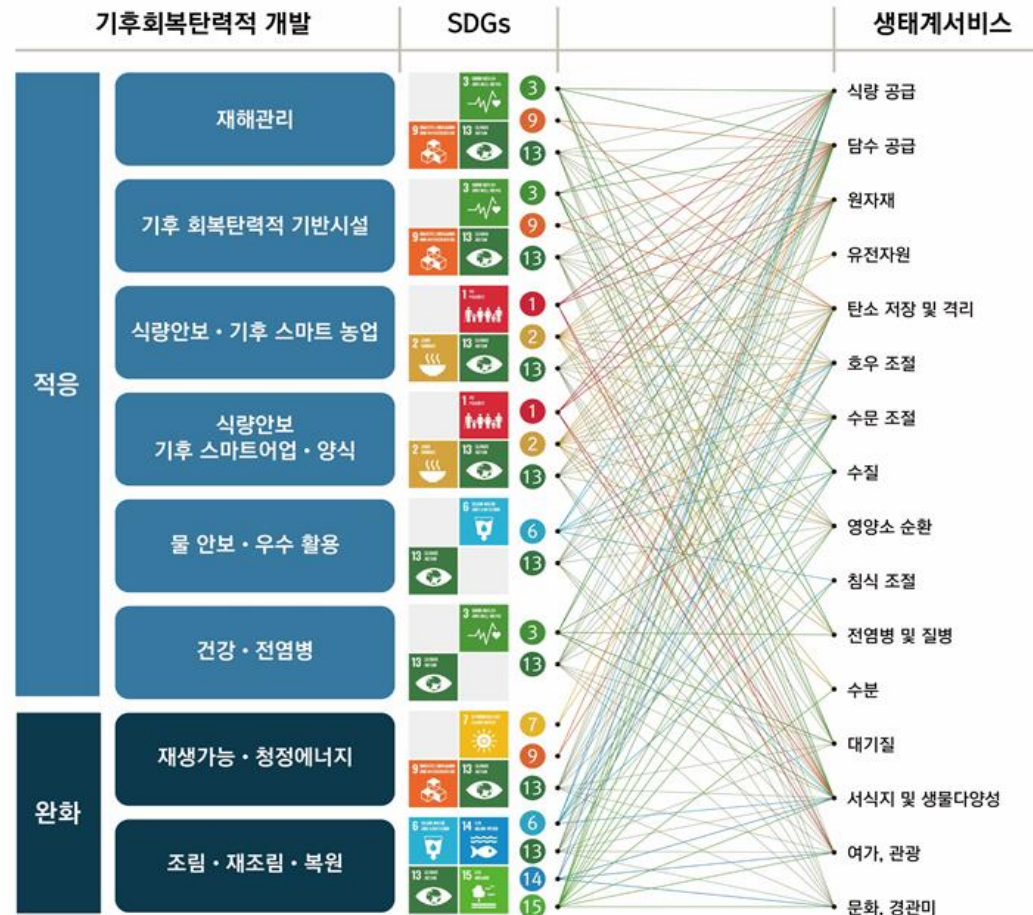
1. 기후위기와 기후탄력적 개발

기후탄력적 개발



AR6 기후탄력적 개발 (CRD, Climate Resilient Development)

온실가스 저감과 모두를 위해 지속가능한 개발을 지원하는 적응을 실행하는 수단



2. 미래전망과 시나리오&모델링

미래전망기법

델파이법

미래 특정시점을 예측하거나 현재 상태에 대한 일반화된 자료가 부족할 경우, 전문가적인 직관을 객관화하는 예측의 방법임

역사적 유추법

역사적 현상에 작용하던 힘이 미래에도 유사하게 나타날 것이라는 가정하에 과거 연장 혹은 연속선상에서 미래 예측하는 방법

임무유동 다이어그램기법

미래에 실현하고자 하는 행사나 임무의 결정과정에서 상황을 정리하여 '미래에 무엇을 할 수 있을지'를 선택할 수 있는 범위를 알 수 있게 해 줌

모의실험법

유사한 모형을 통해 실체의 특징을 알고 그 운영방법이나 문제점을 발견하는 방법임

시나리오기법

시나리오 - 미래에 발생할 것이라고 예상되는 일련의 가상적인 일들의 순서 - 작성을 통해 미래 대비에 목적이 있음

결정의 나무기법

도식적인 방법을 통하여 앞으로 전개될 상황이나 시간을 마치 나뭇가지가 뻗어가듯이 그려가는 기법임

교차충격기법

복수의 미래예측 대상을 상호 비교하여 발생확률을 산출한 결과에 따라 발생 가능성을 예측하는 기법임

게임기법

모형을 상호경쟁적인 상황으로 전개하여 경쟁대상간에 실제상황 전개시, 승패의 결과를 예측하기 위해 활용하는 방법임

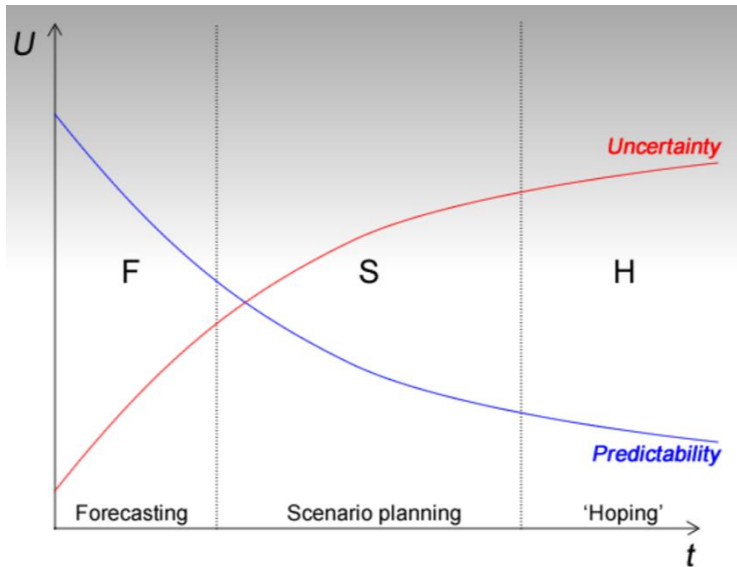
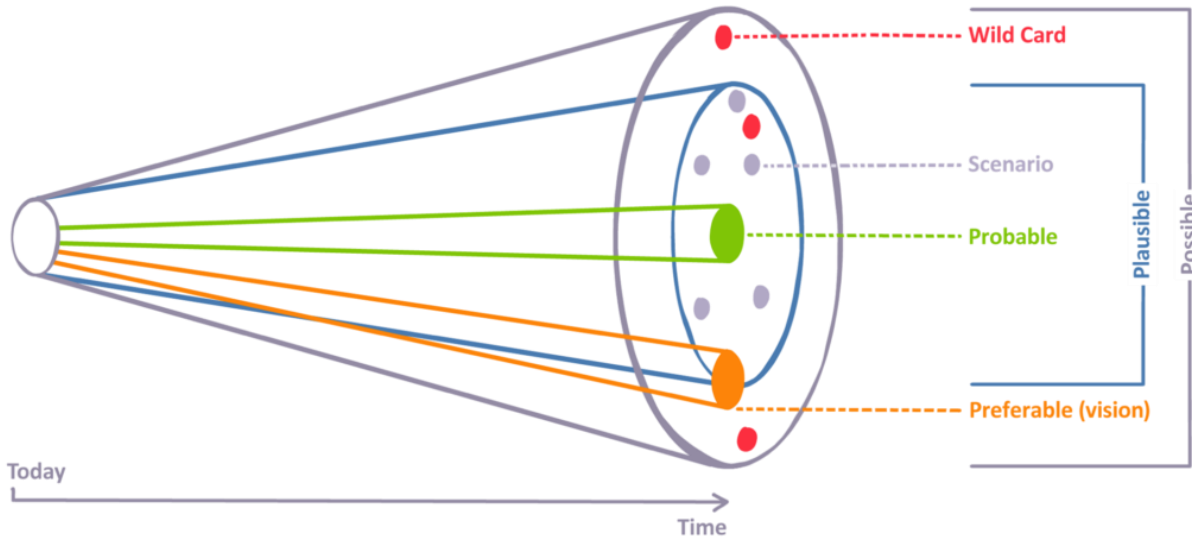
조사예측기법

질문지를 작성하여 응답자의 답변내용을 기초로 미래를 예측하는 방법임

2. 미래전망과 시나리오&모델링

미래전망기법과 기후변화 연구

- Plausible: Possibilities that could happen given the bounds of uncertainty
- Probable: Scenarios and possibilities that are likely to happen
- Possible: The widest range of scenarios, including all possibilities
- Preferred: The vision we have for possibilities we want to see come true



예측

미래는 전망이 가능하며 언제나 적절한 정답이 존재한다고 가정
불확실성에 대비하면서, 명확한 하나의 결론을 이끄는 데 초점

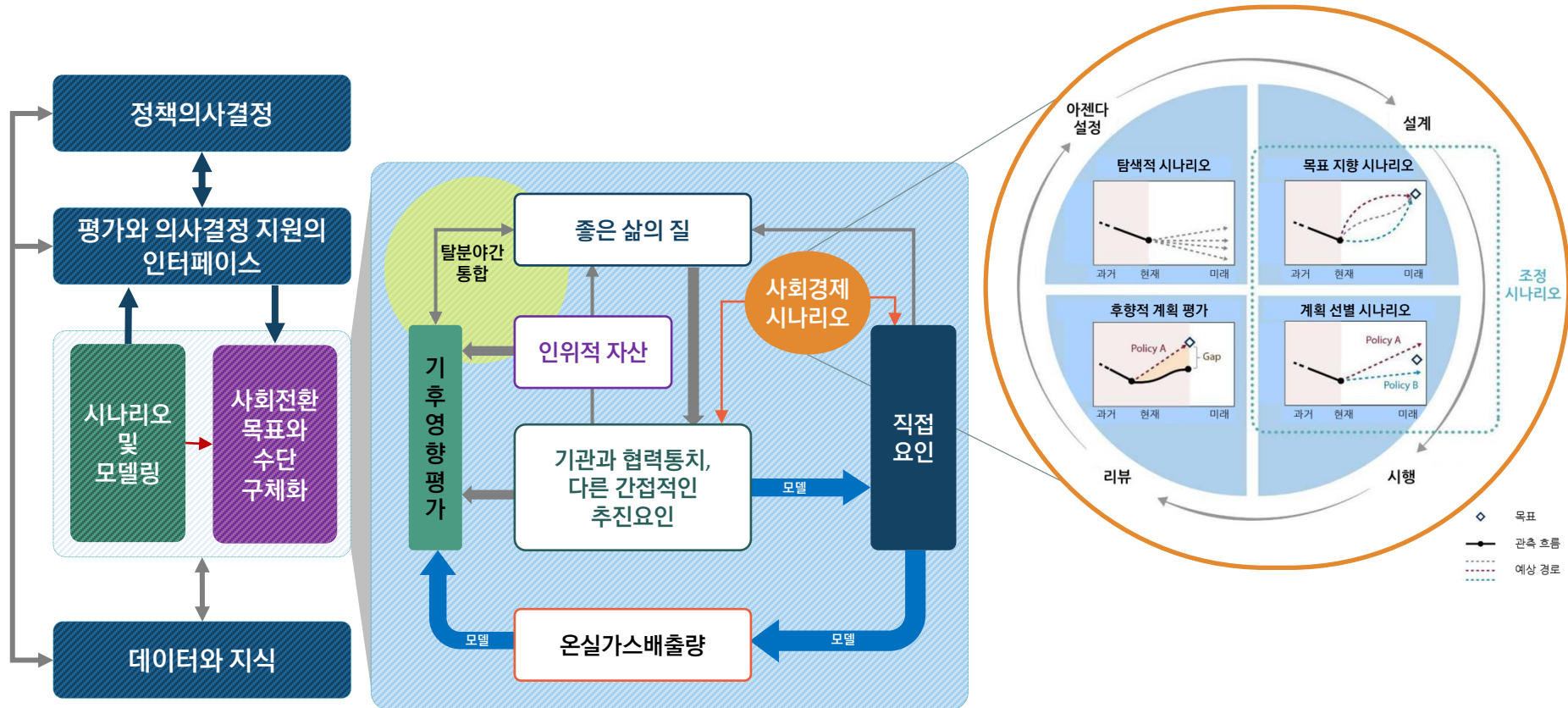
시나리오

원인과 결과에 기초해 미래를 훨씬 더 개념적으로 묘사
예정된 결론에 얽매이지 않고 가능한 모든 변수와 대안을 고려

2. 미래전망과 시나리오&모델링

시나리오&모델링의 특징

- ▶ 시나리오 및 모델은 인간과 자연의 관계를 파악하고, 기후위기 극복을 위한 사회전환 목표 및 수단을 구체화할 수 있음
- ▶ 시나리오는 (i) 의제 설정 (ii) 계획 설계, (iii) 계획 실행 및 (iv) 계획 검토 의 계획 사이클의 주요 단계에서 중요한 역할을 수행할 수 있어 불확실한 미래에 대한 가장 신뢰성 높은 계획적 대응이라 할 수 있음



[계획 수립과 의사결정 과정에서 시나리오 및 모델의 역할]

※ 이미지 출처: IPBES(2016)을 토대로 재작성.

3. 기후변화 연구와 시나리오의 발전

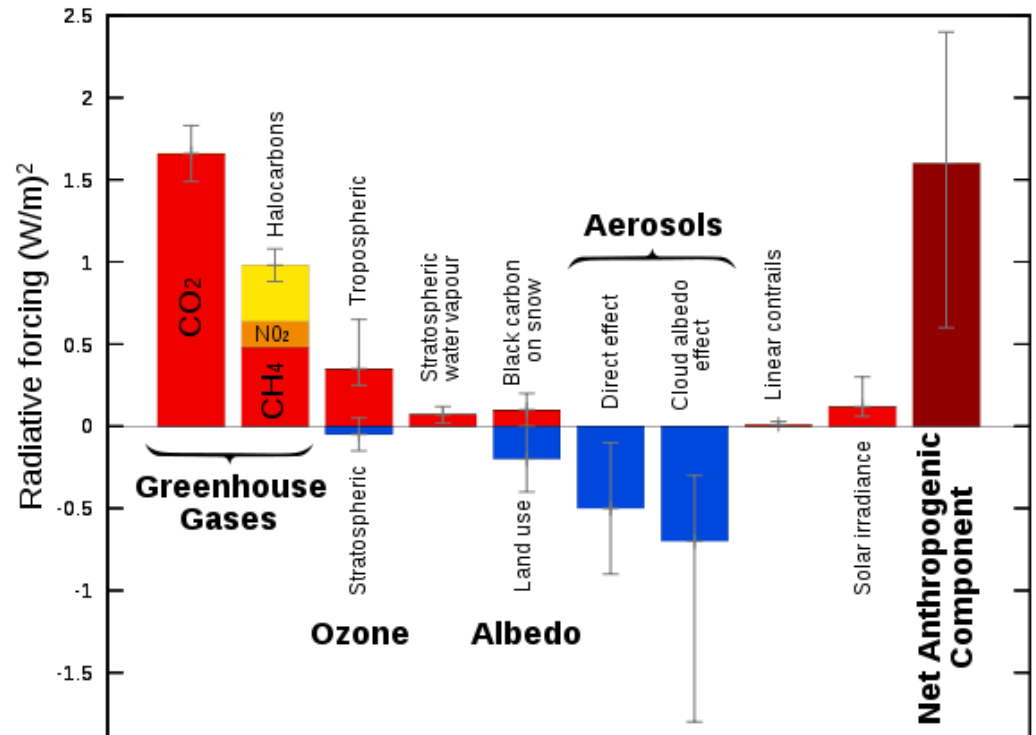
복사강제력

어떤 인자가 갖는 지구-

대기시스템에 영향을 주어 에너지
평형을 유지 변화시키는 영향력

양의 강제력은 지표면 온도를
상승시키고, 음의 강제력은 지표면
온도를 하강시키는 경향이 있음

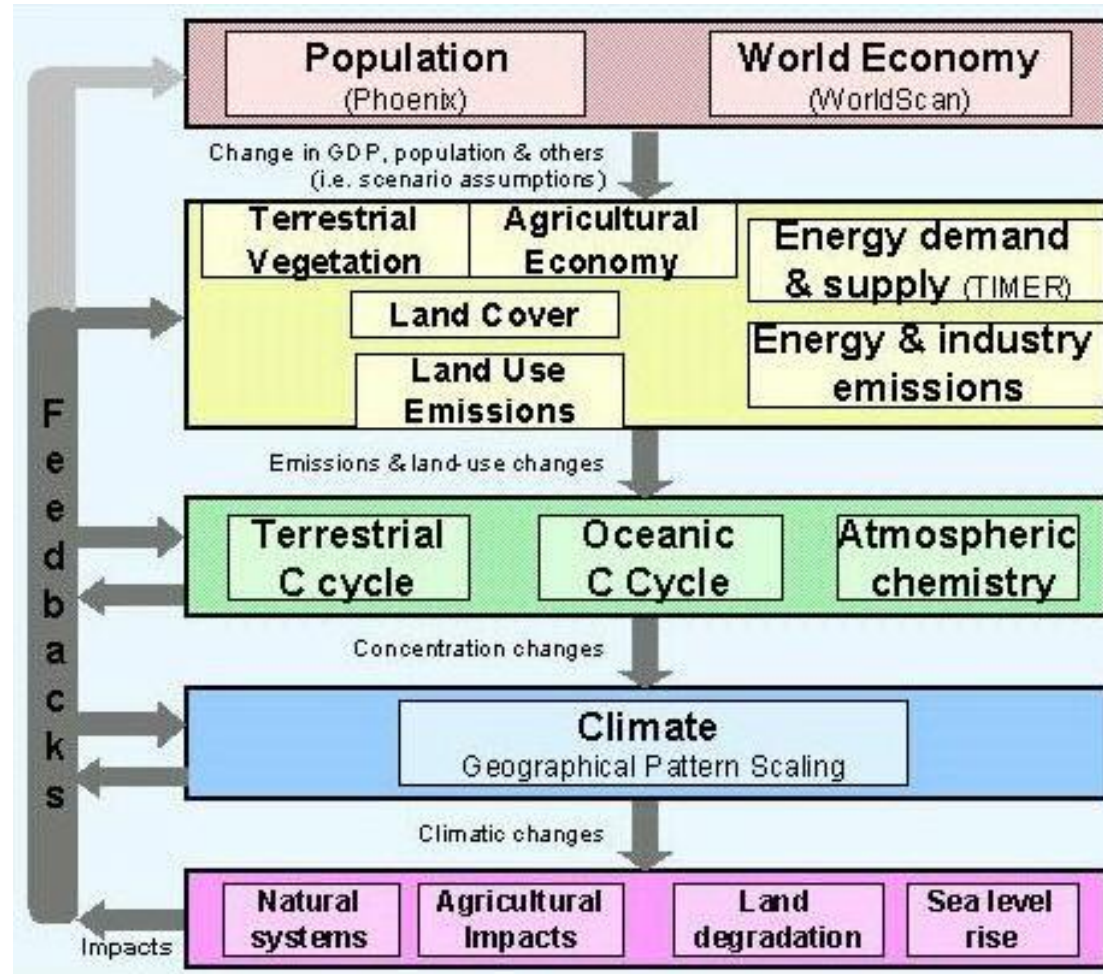
Radiative Forcing Components



3. 기후변화 연구와 시나리오의 발전

기후변화 연구 흐름도

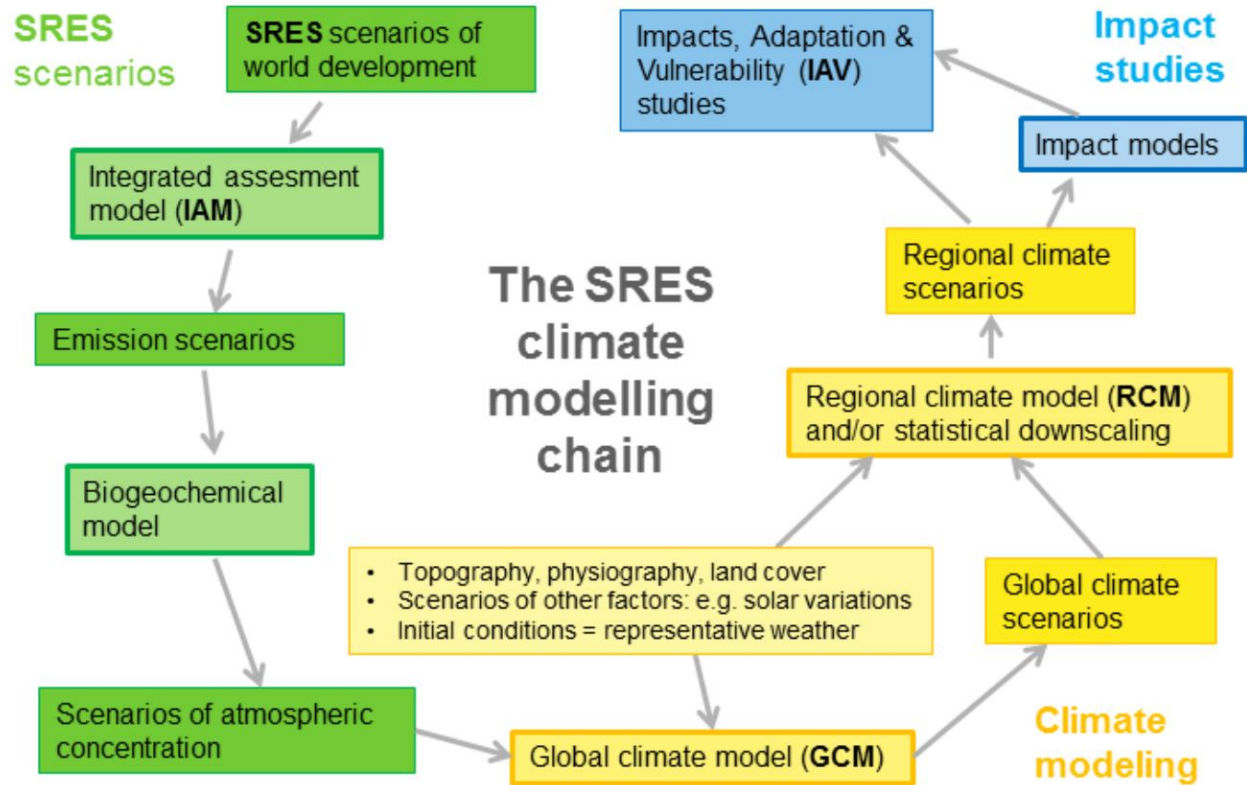
1. 인구, 경제 예측
2. 에너지, 식생, 토지이용 등에 따른 온실가스 배출량 산정
3. 대기 중 농도변화 모델링
4. 기후변화 모델링
5. 기후변화 영향에 따른 피드백



3. 기후변화 연구와 시나리오의 발전

Special Report on Emissions Scenarios (SRES)를 활용한 기후변화 연구

1. 사회경제시나리오
2. 온실가스 배출 시나리오
3. 대기중 온실가스 농도 시나리오
4. 전지구 기후변화 시나리오
5. 지역 기후변화 시나리오
6. 기후변화 영향

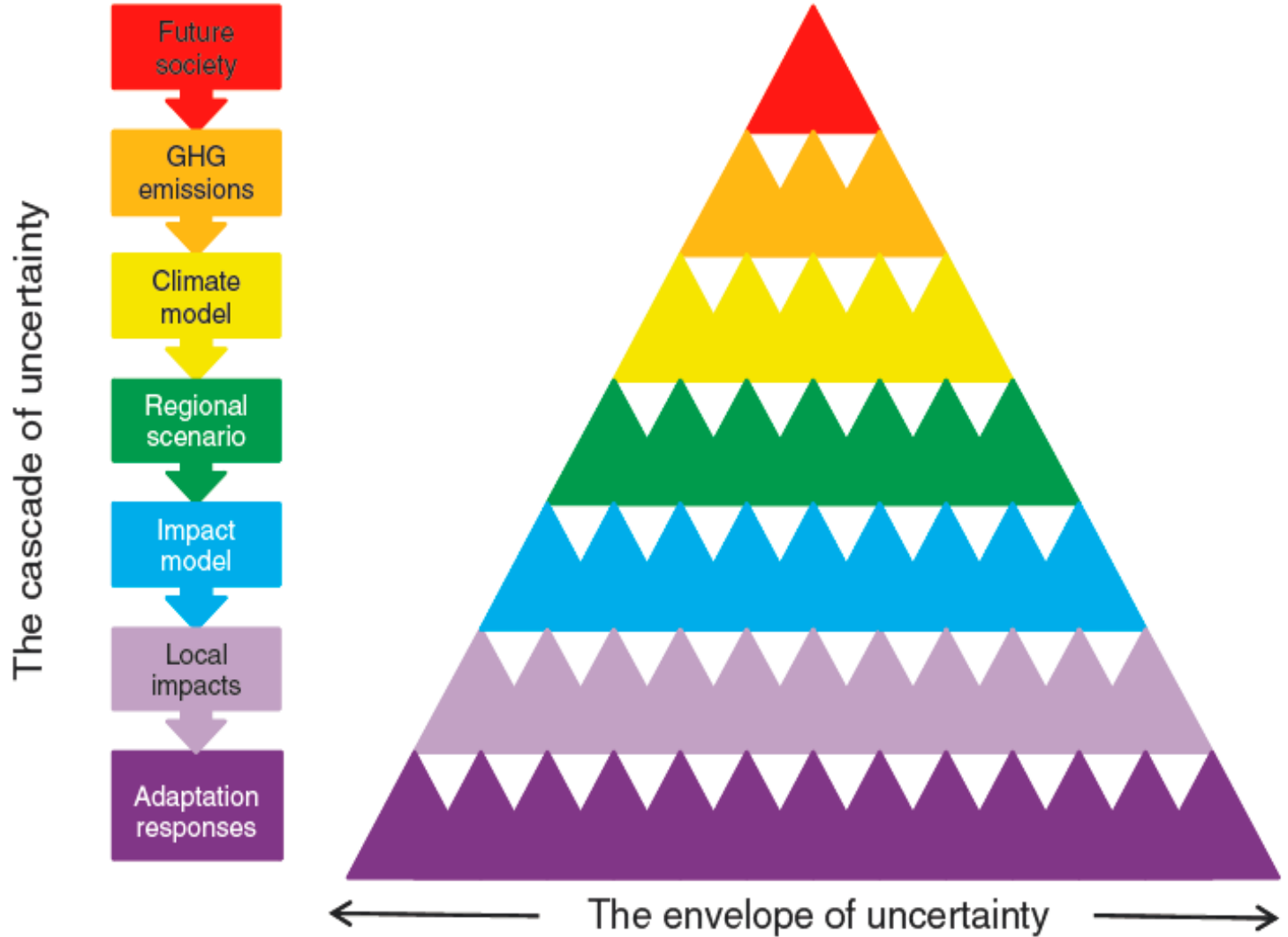


The SRES chain of scenarios and models. Image source: SMHI Rossby Centre.

출처: IPCC Forth Assessment Report (AR4)

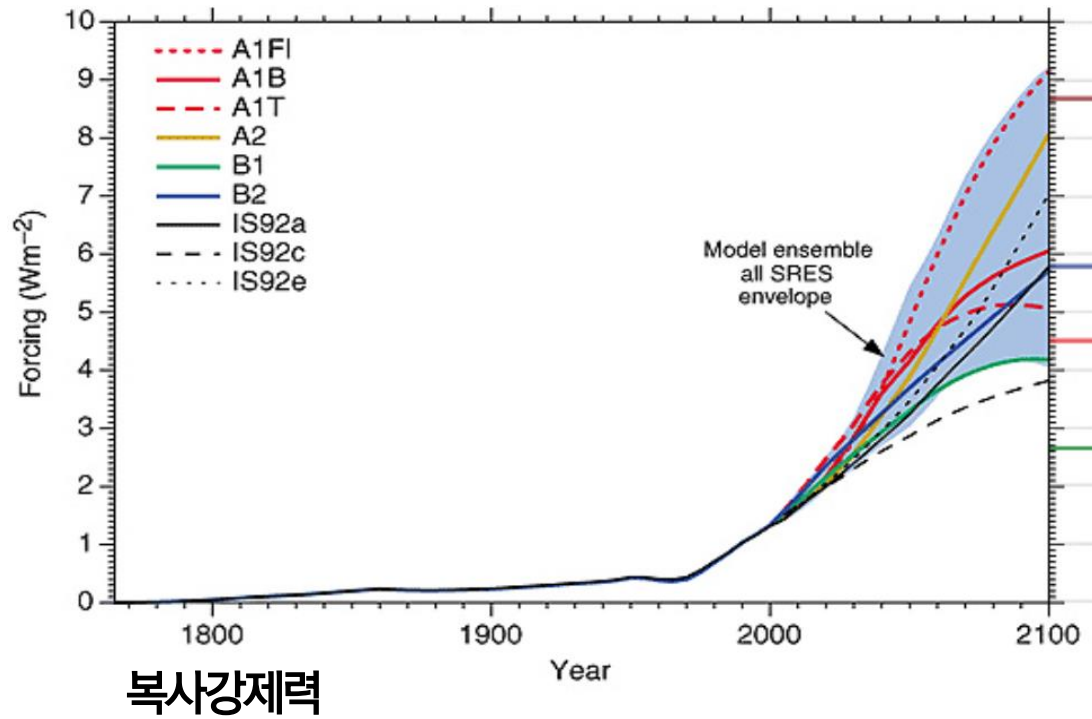
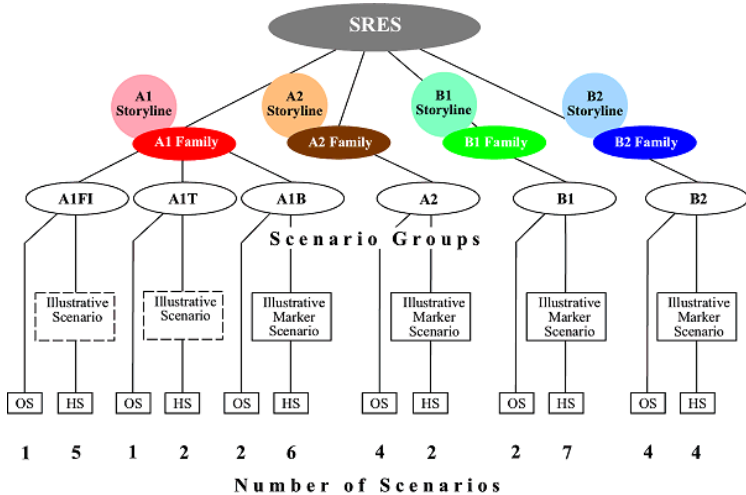
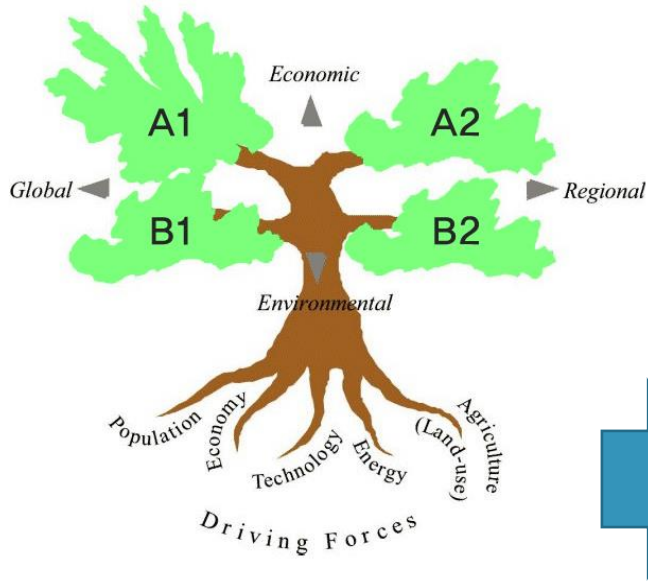
3. 기후변화 연구와 시나리오의 발전

불확실성



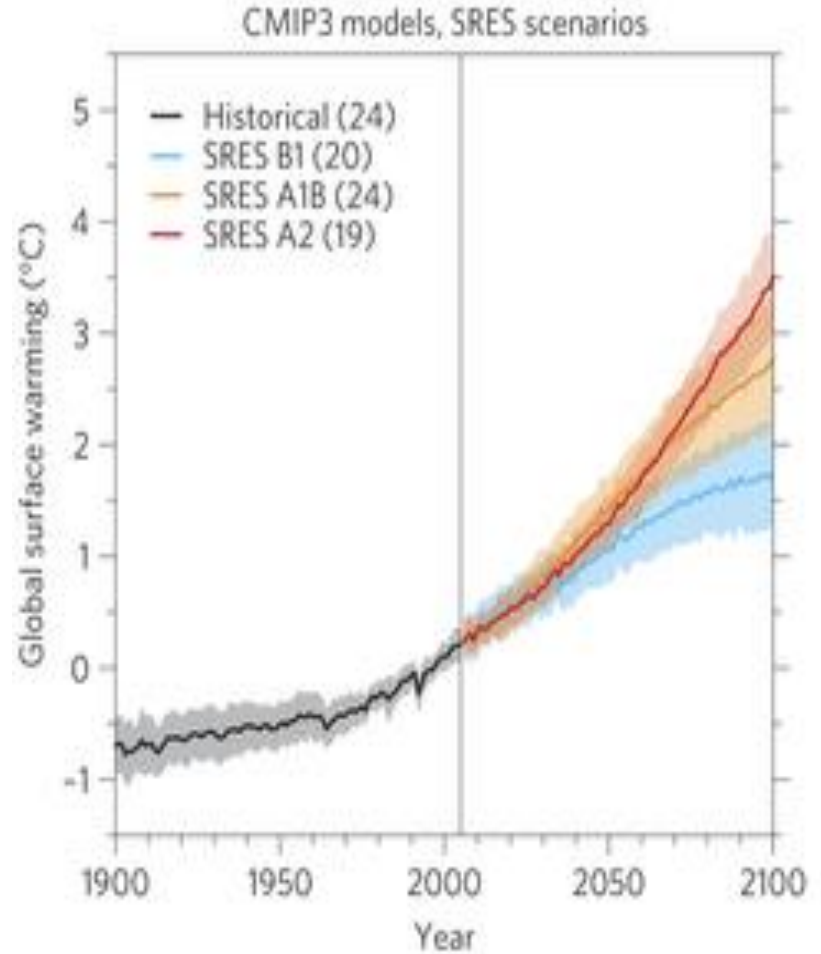
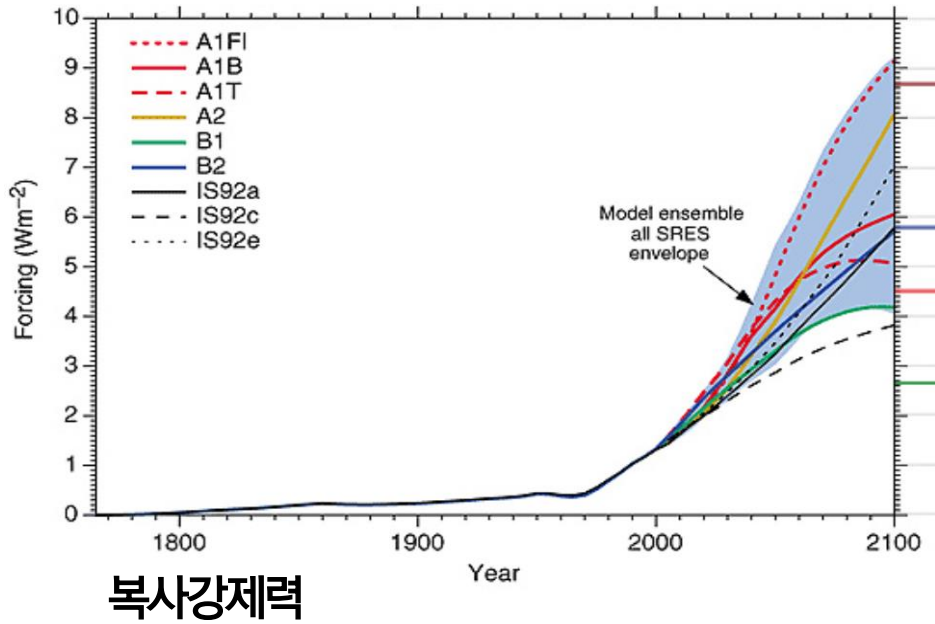
3. 기후변화 연구와 시나리오의 발전

Special Report on Emissions Scenarios (SRES)와 복사강제력



3. 기후변화 연구와 시나리오의 발전

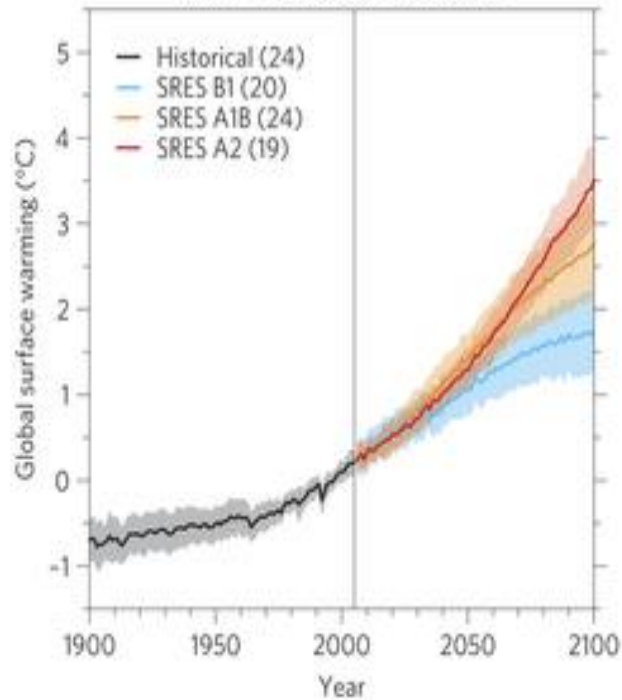
SRES기반 복사강제력과 기후변화



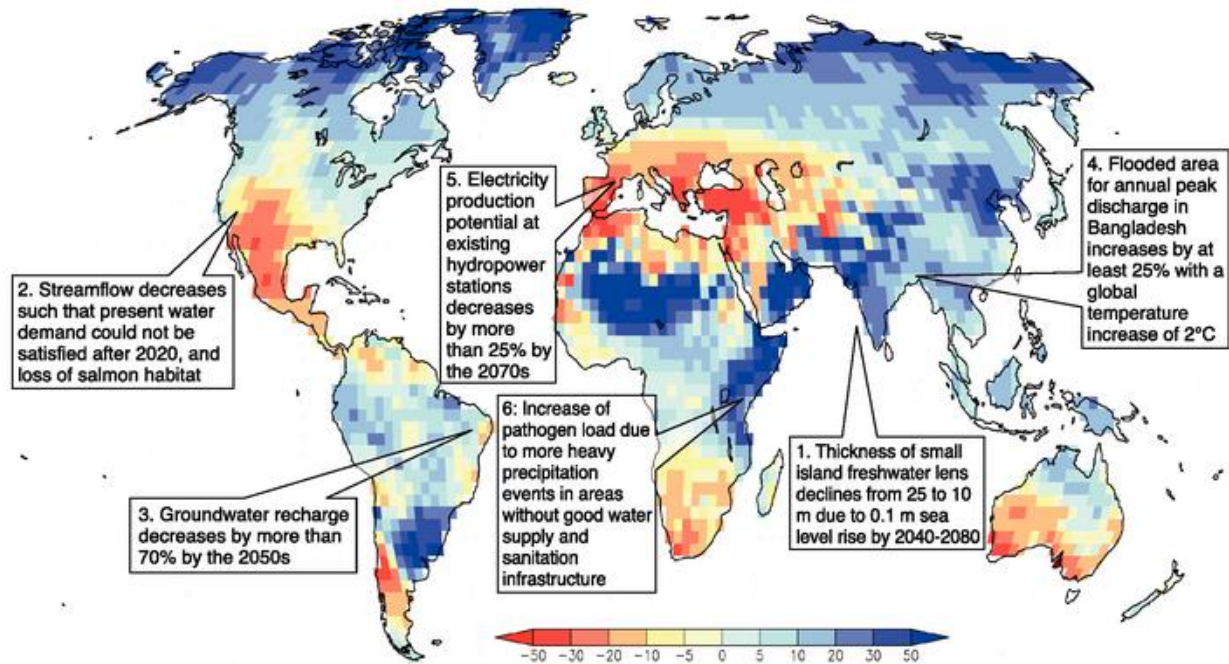
3. 기후변화 연구와 시나리오의 발전

SRES기반 기후영향

CMIP3 models, SRES scenarios



기후변화



Illustrative map of future climate change impacts on freshwater

3. 기후변화 연구와 시나리오의 발전

SRES관련 시나리오 구현

Table 1 Narrative Scenarios for land use and urban structure

Key words	Scenario A	Scenario B
Migration: Decrease in population across all region	Population and capital would be concentrated more in urban areas because of the increase in urban preference of the people and pursuit of convenience/efficient lifestyles.	Decentralization of population and capital would occur because of the increasing need for slower lifestyles of the people.
Metropolitan area:		
Urban	Intensive land use (vertical use of land area including underground space) in urban areas would allow people to live near their work places, and the ratio of people who live in convenient urban areas increases.	It becomes more common to move out from urban centers and people want to migrate where living environment matches with their own lifestyles. The capital city and other core cities remain moderate in size and population.
Suburb	Emigration of population would be observed in suburb area, however, most of the it would be redeveloped as amusement facilities or natural symbiosis areas through well-planned and effective urban designing.	Outflow of population and capital would continue. Therefore, the regeneration plan is targeted to develop these areas as independent urban cities rather than suburbs of mega-city.

3. 기후변화 연구와 시나리오의 발전

SRES관련 시나리오 구현

Table 2 Narrative scenarios for the economy and the industry

Keywords	Scenario A	Scenario B
Economy:		
Annual growth rate	• Approximately 2% of GDP per capita growth rate	• Approximately 1% of GDP per capita growth rate
Technology development rate	• High	• Moderately high
Industry:		
Market	• Reducing regulation	• Penetration of market rules with moderate regulation
Primary industry	• Decrease in share • Increase in import dependency	• Relatively less decrease • Reduced import dependency
Secondary industry	• Tendency to heighten the added value • Globalization of production bases	• Decrease in share • Limited production of diversified products with local brand
Service industry	• Increase in share • Increase in productivity	• Increase in share • Increase in social activity

3. 기후변화 연구와 시나리오의 발전

전 지구 시나리오 개발 방법의 변화 (AR4→AR5)

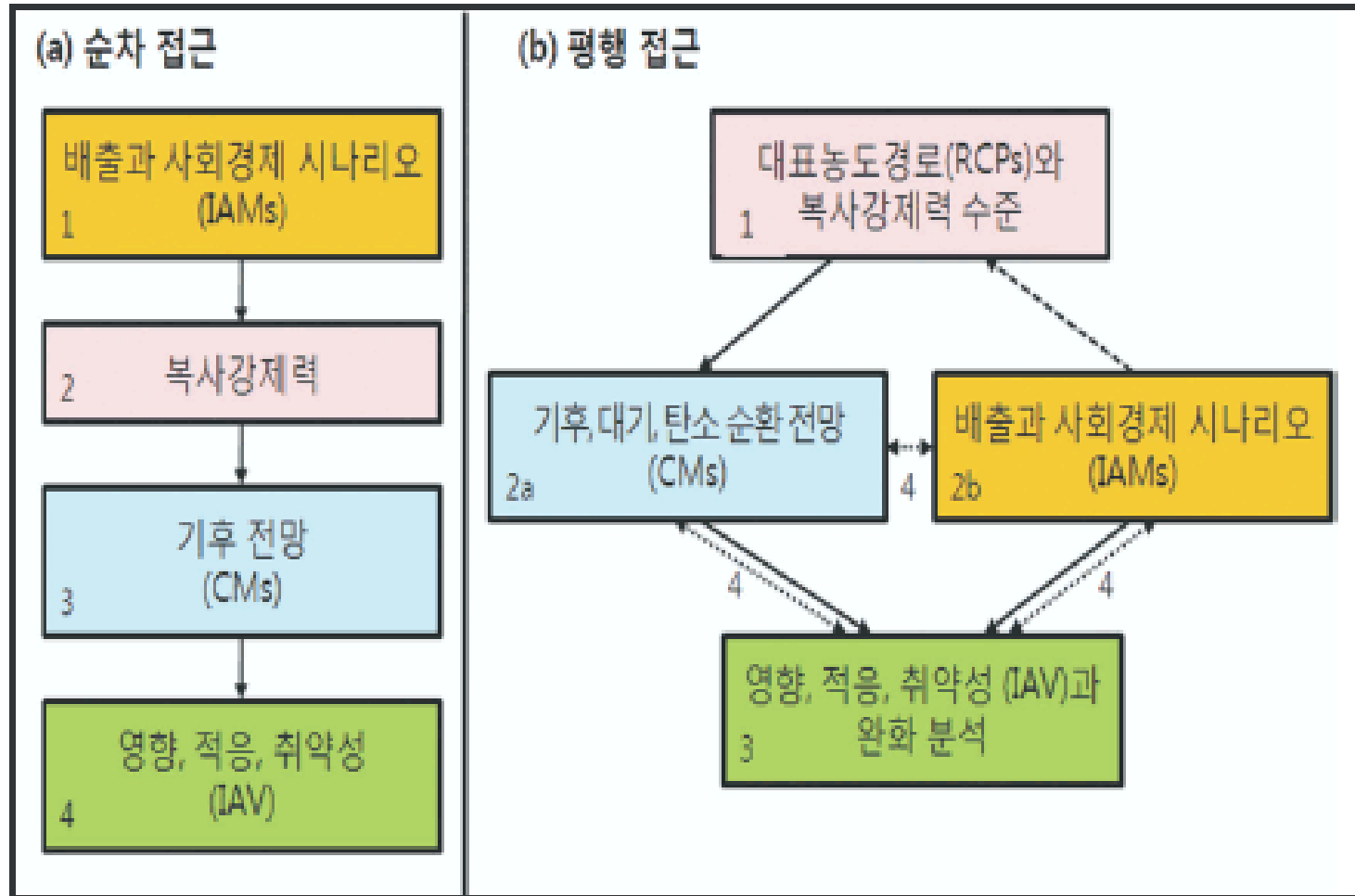


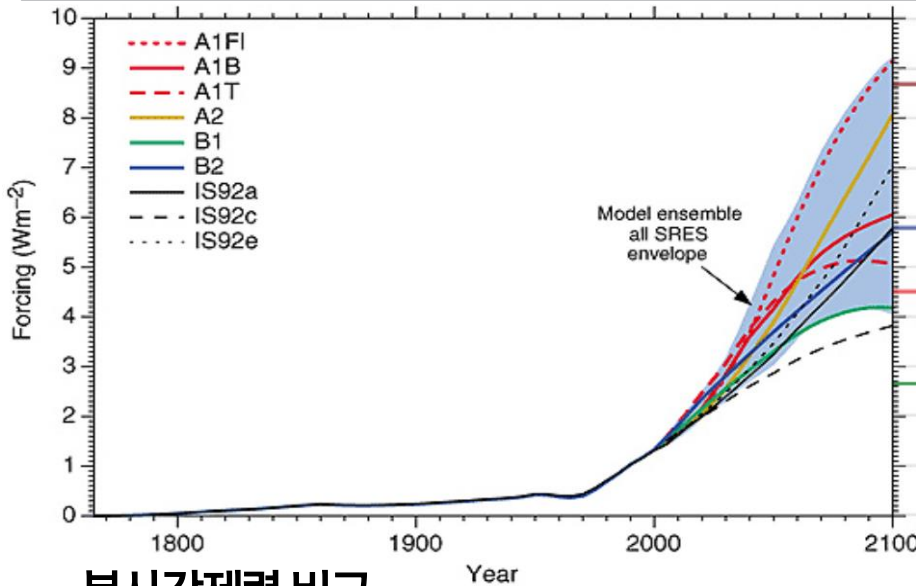
그림 1. 전지구 시나리오 개발을 위한 접근 방법. (a) 순차적 접근과 (b) 새로운 평행적인 접근 방법. 숫자는 순서를 나타낸다

3. 기후변화 연구와 시나리오의 발전

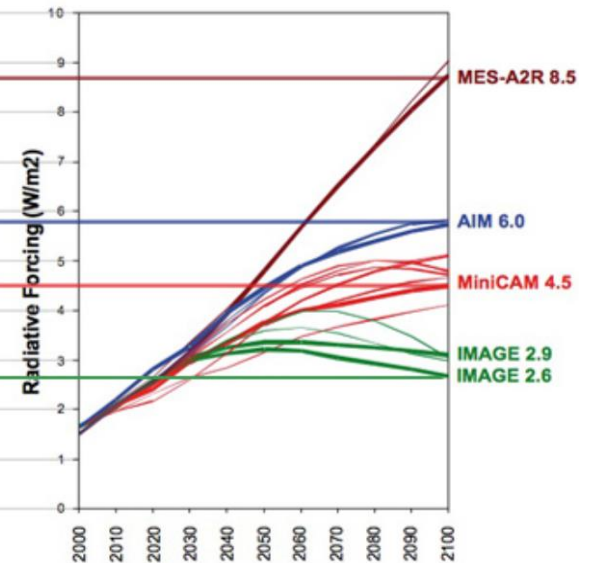
대표농도경로(RCP)

인간 활동이 대기에 미치는 복사강제력으로 기후변화 대응정책과 연계하여 선정함(SRES 의존)

RCP 시나리오 기후변화 대응정책과 연계하여 선정	SRES 시나리오 미래 사회구조를 중심으로 선정
RCP2.6 : 인간 활동에 의한 영향을 지구 스스로가 회복 가능한 경우	
RCP4.5 : 온실가스 저감 정책이 상당히 실현되는 경우	B1(지속발전형 사회) : 지역간 격차가 적고, 인구감소, 청정자원 절약기술 도입
RCP6.0 : 온실가스 저감 정책이 어느 정도 실현되는 경우	A1B(고성장 사회) : 화석에너지와 비화석 에너지원 균형, 신기술, 고효율화 기술 도입
RCP8.5 : 현재 추세(저감없이)로 온실가스가 배출되는 경우(BAU 시나리오)	A2(다원화 사회) : 인구증가, 경제성장은 낮고, 환경에의 관심도 상대적으로 낮음



복사강제력 비교

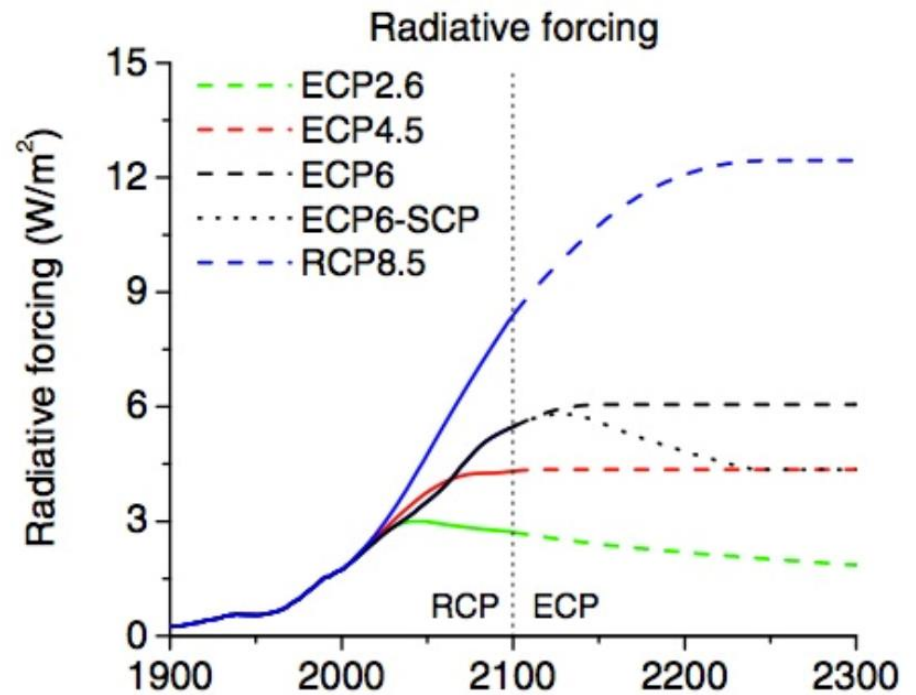
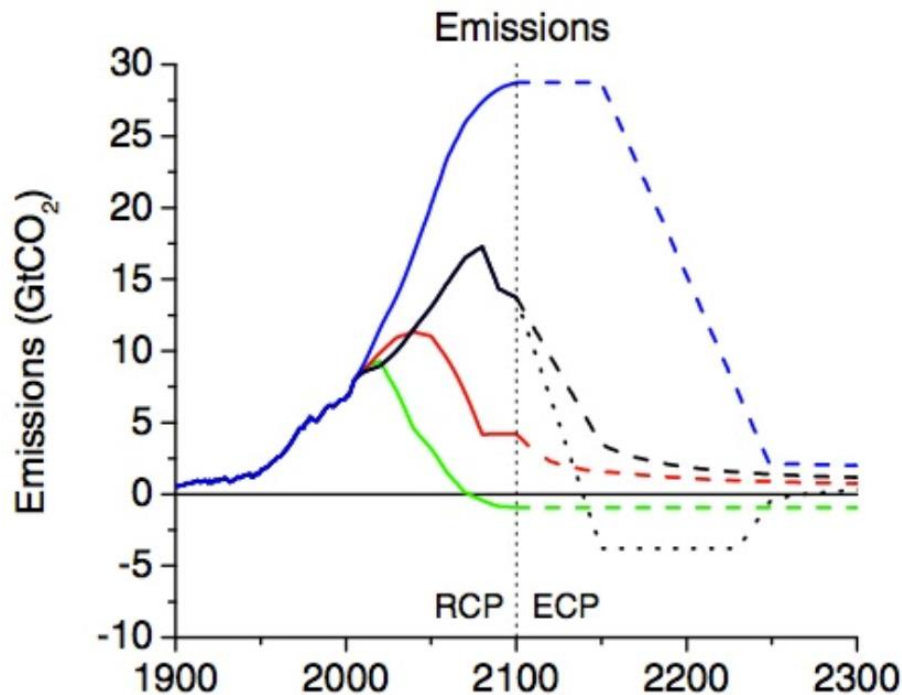


3. 기후변화 연구와 시나리오의 발전

대표농도경로(RCP)

2300년까지의 가정을 통해서 2100년까지의 기후변화를 묘사해서 제공

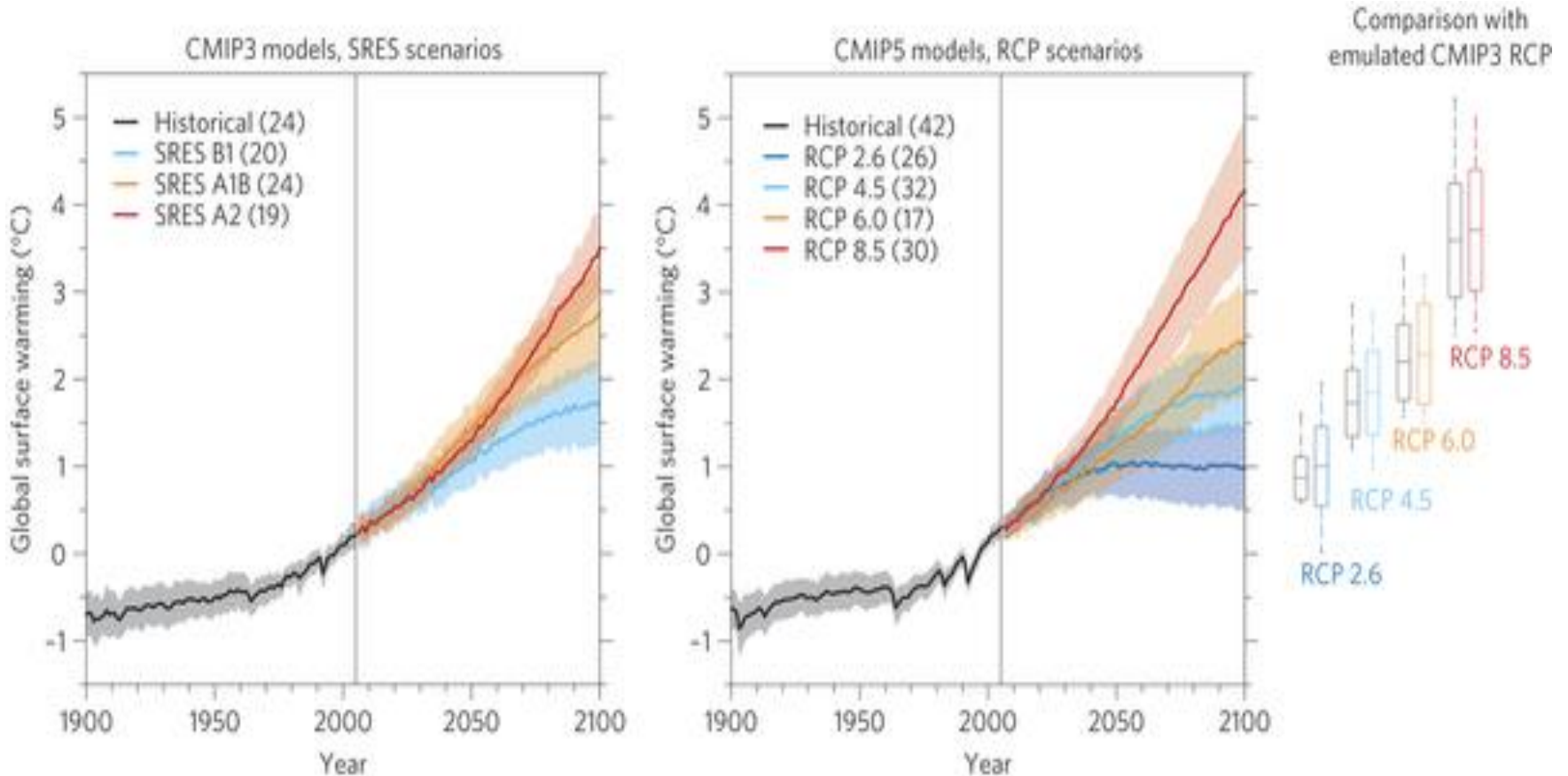
- 인위적 배출의 경우 시나리오 별로 2150년, 2250년에 일정해지는 것을 가정함



3. 기후변화 연구와 시나리오의 발전

대표농도경로(RCP)

기후변화 비교



3. 기후변화 연구와 시나리오의 발전

공유된 사회경제 경로(SSP)

온실가스 배출에 영향을 주는 에너지사용, 토지이용변화 등에 영향을 주는 사회-경제 변화에 대한 시나리오

SSP1 (지속가능한 사회)

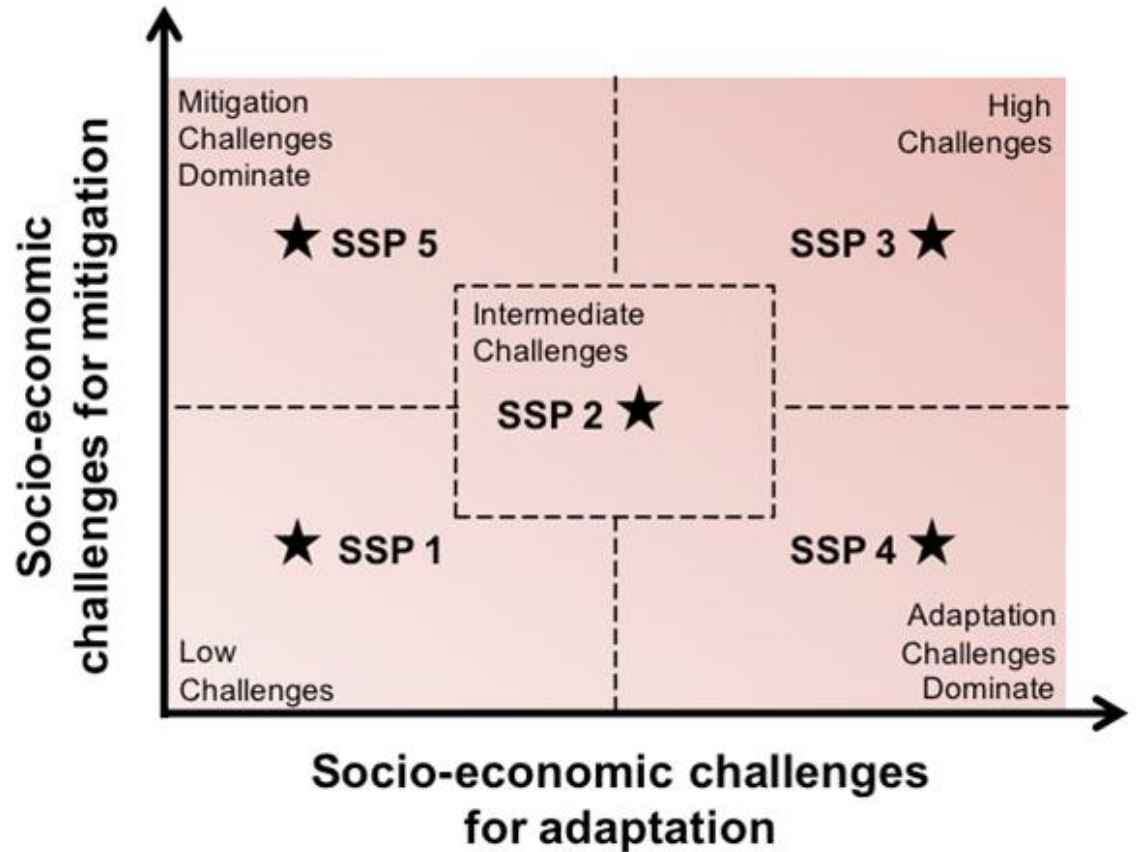
SSP2 (현재와 지속 가능한 미래의 중간)

SSP3 (파편화된 세계)

SSP4 (불평등한 세계)

SSP5 (전통적인 개발)

* 시나리오는 적응, 완화의 난이도로 구분함



3. 기후변화 연구와 시나리오의 발전

공유된 사회경제 경로(SSP)

① SSP1 (지속가능한 사회)

이 시나리오는 **지속가능한 사회로 화석연료 등의 자원의 의존도를 줄여** 미래 변화에 능동적으로 대처할 수 있고, 기후변화에 적응함에 있어서도 사회경제적인 부담이 적은 사회시나리오이다. 이 사회는 저소득 국가의 급진적인 개발을 지원하여 **불평등을 줄이고**, 가난인구 비율을 줄이고, **급진적인 기술개발과 환경교육을 통해서 기후변화에 쉽게 적응**할 수 있게 만들어 주는 사회모습이다. 경제는 **공유경제 실현**되고 세계가 하나가 되는 모습을 담고 있으며, **기술은 환경 친화적인 기술로 전환**된다. 소비는 에너지 효율이 높은 제품을 선택하거나, 육류소비를 지양하는 등 에너지가 과대 투입되는 요소에 대한 소비는 지양한다. 인구 저성장 특성에 맞게 고학력 교육에 투자한다. 또한 **거버넌스**를 통해서 개발 목표를 달성하고 문제점을 해결하는 가운데, 새천년 개발 목표는 10년 혹은 20년 후에 달성한다. 이는 교육, 안전한 물 확보, 향상된 위생, 보건 의료 등을 통해 이를 수 있다. 기후변화 취약성과 다른 전 지구적 과제들은 대기오염 관리 정책과 청정에너지 정책으로의 전환을 통해서 해결할 수 있다.

② SSP 2 (현재와 지속 가능한 미래의 중간)

세계적으로 **현재의 발전양상이 수십 년간 지속**되고, 현재와 같은 개발 전략이 지속된다. **에너지와 자원의 절약은 과거 흐름과 유사한 양상**으로 이어지고, 점차적으로 화석연료에 대한 의존도를 줄여간다. 저소득 국가의 발전양상은 일부 국가는 성공적인 발전전략을 통해 성공하지만, 일부 국가는 그렇지 못하는 불균형이 생긴다. 대부분의 경제는 세계가 잘 연계되어 안정된 상태를 이룬다. 일인당 소득은 전 지구적인 평균으로 보았을 때 개발도상국과 선진국과의 수렴은 느린 속도로 이루어진다. 교육에 대한 투자는 인구성장을 늦출 만큼 높지 않고, 새천년 개발 목표의 달성은 몇 십 년 더 늦춰지게 되고, 물 부족, 위생, 보건 등의 경우는 대기오염정책이나 청정에너지 정책과 같이 중간단계의 성공을 거둔다.

③ SSP 3 (파편화된 세계)

세계의 모습은 극도로 가난한 지역, 부국, 개발도상국 등으로 지역별로 분리되고, 대부분의 국가들은 인구성장에 따라 낮아지는 삶의 질을 높이기 위해서 허우적거리게 된다. 국가간 지역연합이 생기지만, 지역간 장벽이 생기게 되고 세계는 지역별 특성에 따라 파편화 되게 된다. 새천년 개발 목표는 실패하게 되며, 화석 에너지 의존도를 줄이는 것은 별로 진척을 이루지 못하고, 대기오염관리도 성공하지 못한다. 국가들은 에너지와 식량 안보를 달성하기 위해서 해당 지역 **내에 집중**하게 되면서, 세계 경제는 지역화 되게 된다. 국제적인 동조나 투자는 줄어들게 되어 경제 성장의 격차가 생긴다. 인구 성장은 다른 시나리오와 다르게 지역적 교육이나 경제성장 **트렌드**에 따라 성장하는 시나리오이다. 일부 저소득 국가의 도시화는 충분한 인프라 공급이 되지 않아 슬럼화를 야기할 수 있으며, 인구의 급격한 증가에 따라서 온실가스의 완화효과는 상대적으로 미약하다. 지역화된 경제블록은 전세계의 물류량을 줄이고, 기후변화에 따라 지역을 떠나야 하는 인구수는 늘어나게 된다.

④ SSP 4 (불평등한 세계)

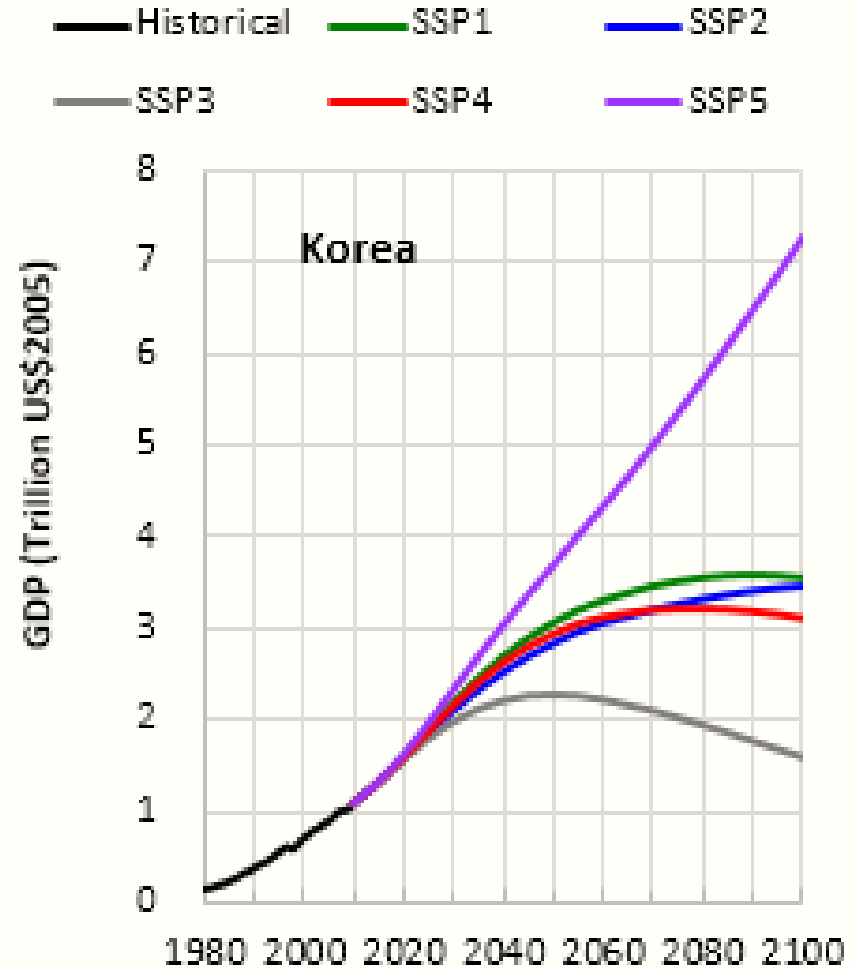
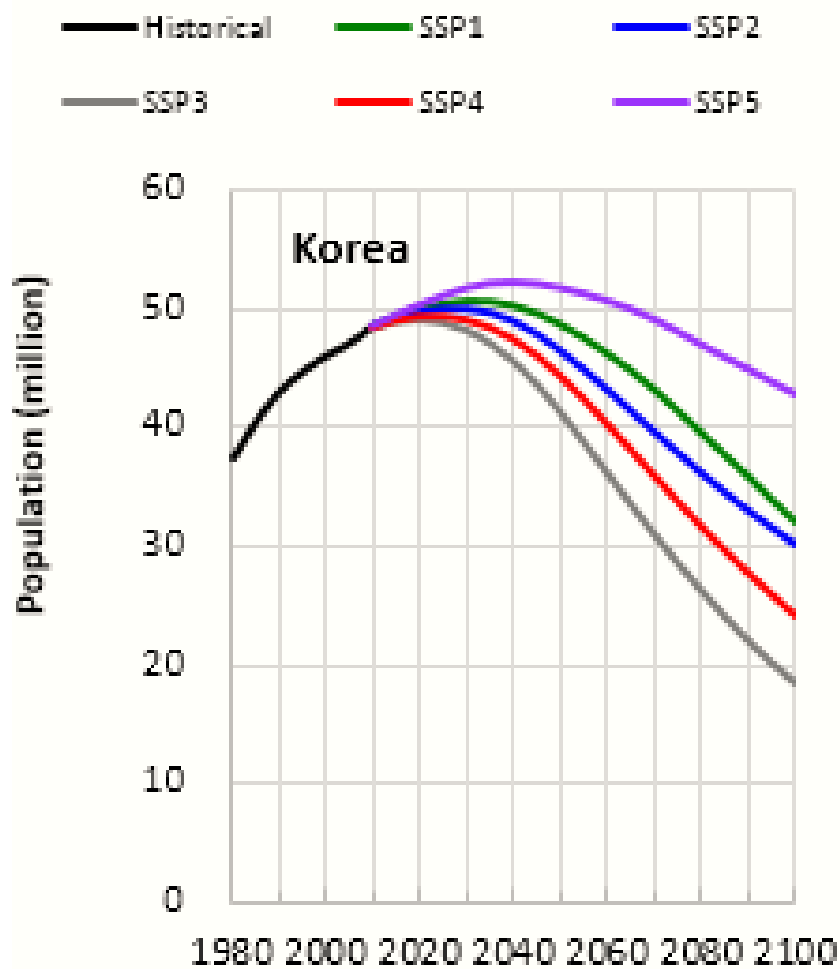
이 시나리오는 **불공정한 세계** 모습을 그린 시나리오이다. **몇몇 선진국이 온실가스 배출량의 많은 부분을 차지하고 있고, 가난한 국가들은 배출량은 적지만 기후변화에 매우 취약하게 된다.** 일부 선진국이 배출량의 많은 부분을 차지하고 있어서, 이들 국가들의 연구투자 등을 통해서 대체 기술들을 개발할 수 있어서 온실가스 배출량 완화에 효과적으로 대응할 수 있다. 하지만 가난한 국가들의 경우 충분히 발전하지 못해서 온실가스 배출량이 적음만큼 기후변화 적응 능력이 부족하여 많은 어려움을 겪게 된다.

⑤ SSP 5 (전통적인 개발)

전 세계 국가들은 경제성장을 중요시하기 때문에 사회, 경제적 문제의 대부분은 경제적 관점에서 해결하려고 노력한다. 급격한 경제성장을 위해서 상대적으로 비용이 저렴한 **화석연료에 의존**하게 되는 시스템을 유지하게 되며, 온실가스 배출량 완화에 있어서 어려움을 겪게 된다. 급격한 개발을 통해 인프라를 충분히 갖추게 되기 때문에 기후변화에 따른 이상기후를 쉽게 극복할 수 있다.

3. 기후변화 연구와 시나리오의 발전

공유된 사회경제 경로(SSP)



3. 기후변화 연구와 시나리오의 발전

공유된 사회경제 경로(SSP)의 모델 적용을 위한 파라메타 조정

List of assumptions and methods of adjusting parameters.

Element	SSP1	SSP2	SSP3	SSP4	SSP5	Corresponding parameters and adjustments
Total and labor population	Based on (Kc and Lutz, 2017)					Population and labor force.
Income growth	Based on Dellink et al. (2017)					The total factor productivity is adjusted to hit the targeted GDP.
Renewable energy cost decrease speed	High	Med	Low	High	Low	Intermediate input and factor productivity parameters of renewable energy sectors are decreased. The rate of change is calculated based on the base-year price and the 2050 power generation cost target. The 2050 target is dependent on IEA (2012) and Med is this reference value. High and low are calculated as 1.25 and 0.75 times this value, respectively.
Social acceptance of modern biomass use	Low	Med	High	High	Med	Two parameters are changed: (1) the biomass power generation logit scale parameter and (2) the transport biofuel logit share parameter. Med is the default number, which is equal across renewable energy sources. High and low are calculated as 1.25 and 0.75 times these values, respectively.
Renewable energy preference	High	Med	Med	High	Low	The renewable power generation logit scale parameter is changed. Med is the default number. High and low are calculated as 1.25 and 0.75 times this value, respectively.
Nuclear technological progress speed	Med	Med	Low	High	Med	The intermediate input and factor productivity parameters of the nuclear power sector are changed. The rate of change is calculated based on the base-year price and the 2050 power generation cost target. The 2050 target is dependent on IEA (2012), and Med is the reference value. High and low are calculated as plus or minus a 2% annual change in production costs, respectively.
Social acceptance of nuclear energy	Low	Med	High	Med	Med	The nuclear power generation logit scale parameter is changed. Med is the default number. High and low are calculated as 2.0 and 0.1 times this value, respectively.
Preference for fossil fuel-fired power plants	Low	Med	High	Med	High	The fossil fuel-fired power generation logit scale parameter is changed. Med is the default number. High and low are calculated as 2.0 and 0.5 times this value, respectively.
Autonomous energy efficiency improvement (AEEI)	High	Med	Low	High/ Low	Med	A mark-up parameter for energy input in the CES and LES functions is changed for the industrial sector and the household sector, respectively. High and low are calculated as plus or minus a 1% annual change in the AEEI percentage, respectively. The LES parameters are changed according to income elasticity. High and low are calculated as 1.25 and 0.75 times the default value, respectively. SSP4 differentiates regionally varied AEEI assumptions. SSP4 high-income countries assume the speed of SSP1 while low-income countries assume the speed of SSP3. SSP5 follows the assumption of SSP2, but the energy efficiency improvement of the transport sector is 0.5% higher.
Energy use coal preference	Low	Med	High	Low	High	The logit scale parameter in energy source selection for energy end-use sectors is changed. The coal scale parameter is changed over time. Med is the default number. High and low are calculated as plus or minus an annual 1.5% of the default number, respectively.

3. 기후변화 연구와 시나리오의 발전

공유된 사회경제 경로(SSP)의 모델 적용을 위한 파라메타 조정

Element	SSP1	SSP2	SSP3	SSP4	SSP5	Corresponding parameters and adjustments
Oil and gas extraction cost	Med	Med	High	Med	Med	The markup parameter for the coal mining sector production cost is changed. Med is set following Rogner (1997), but the maximum annual increase rate is assumed to 5%. Low means a 1% annual increase.
Intermediate input of material decrease rate	High	Med	Low	High	Low	The markup parameters for the oil and gas extraction sectors production cost are changed. Med is set following Rogner (1997) and High has a 1.5 fold- cost. Moreover, the maximum annual increase rate is assumed to be 5%. High means a 7.5% annual increase.
CCS (Carbon Capture and Storage) cost	Med	Med	Med	Low	Low	Intermediate inputs of steel and non-metal and mineral (cement) goods in all production sectors are changed. Med means a 2% annual decrease. High is a 3% decrease and low is a 1% decrease.
Social acceptance of CCS	Low	Med	Med	High	Med	Productivity parameters in the CCS service provision sector are changed. Productivity parameters are intermediate inputs and primary factor input coefficients. Med is the default number (Fujimori et al., 2015) and low is calculated as 0.5 times the default number.
Household preference for manufacturing goods	Low	Med	High	Low	High	The maximum CCS installation rate is changed. Med is the default value (85%). High and low are 100% and 50%, respectively.
Air pollution control level	Strong	Med	Weak	Weak	Strong	Income elasticity of industrial goods is changed and is reflected in the household consumption LES parameter. Med is the default number. High and low are calculated as 1.5 and 0.75 times the default number, respectively.
Non-energy-related emissions reduction measures cost	Low	Med	High	Low	High	Legislation determines air pollutant emissions control. The details are explained in (Rao, 2017; Riahi et al., 2015) Strong indicates that the emissions coefficient of air pollutants decreases very quickly and weak means the opposite. he emissions intensity (emission per unit of primary energy) for all gases, three SSPs and climate mitigation cases is shown in Supporting information SI Fig. 10.
Yield growth assumptions	High	Med	Low	High /Low	High	The non-energy-related emissions reduction parameter is changed. Med is the default value (Fujimori et al., 2015). High and low are plus or minus 25% of the default value, respectively.
Export tax and import tariff rate for agricultural goods	Low	Low	High	High	Low	The coefficient that represents land productivity is changed following Hasegawa et al. (2015b). SSP4 differentiates between high- and low-income countries, which have high and low yield growth, respectively.
Export tax and import tariff rate for energy goods	Low	Low	High	Low	Low	The export tax and import tariff rate for agricultural goods are changed. High assumes an additional 33% of base-year amount, and low assumes no change to base-year level.
Livestock-oriented food consumption preference	Low	Med	High	High	Low	The export tax and import tariff rate for energy goods are changed. High assumes an additional 33% of base-year amount, and low assumes no change to base-year level.
						The income elasticity of livestock goods is changed and is reflected in the household consumption LES parameter. The actual numbers are shown in Hasegawa et al. (2015b).

3. 기후변화 연구와 시나리오의 발전

공유된 사회경제 경로(SSP)의 모델 적용을 위한 파라메타 조정

Element	SSP1	SSP2	SSP3	SSP4	SSP5	Corresponding parameters and adjustments
Energy use coal preference	Low	Med	High	Low	High	The logit scale parameter in energy source selection for energy end-use sectors is changed. The coal scale parameter is changed over time. Med is the default number. High and low are calculated as plus or minus an annual 1.5% of the default number, respectively.
Energy use electricity preference or electrification speed	High	Med	Med	High	Med	The logit scale parameter in energy source selection for energy end-use sectors is changed. The electricity scale parameter is changed over time. Med is the default number. High is calculated as plus an annual 1.5% of the default number.
Speed of moving away from traditional biomass use	High	Med	Low	Low	High	A coefficient to determine traditional biomass usage is changed. Med is the default number (2% per year). High and low are calculated as plus or minus an annual 0.5% of the default number, respectively.
Service demand for transport	Low	Med	Med	Low	Med	The parameters representing household private car income elasticity and the industrial transport service coefficient are changed. For the former, med = 1.0 and low = 0.75. For the latter, med and low are set at a 0.5% and 1.0% annual improvement, respectively.
Coal mining cost	Med	Med	Low	Med	Low	

3. 기후변화 연구와 시나리오의 발전

기후-사회경제 시나리오 연계

IPCC (AR6) 공통사회경제(SSP) 기후변화 시나리오 공개

- ✓ 제54차 IPCC 총회에서 승인(' 21.08.)
- ✓ 공통사회경제경로 5종 공개 (SSP1-1.9, SSP1-2.6, SSP2-4.5, SSP3-7.0, SSP5-8.5)

개선노력

서술적 → 구체화, 수단화

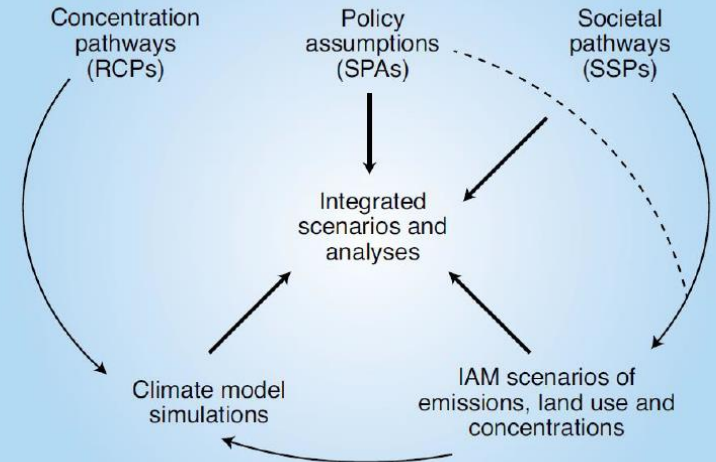
RCP-SSP 통합 노력



1 전환 (TRANSITION) 시나리오 (I4CE, 2019)



2 SSP-SPA-RCP 통합시나리오 체계



시나리오 개선 및 모델평가 결합 제안 (O' Neill et al., 2020)

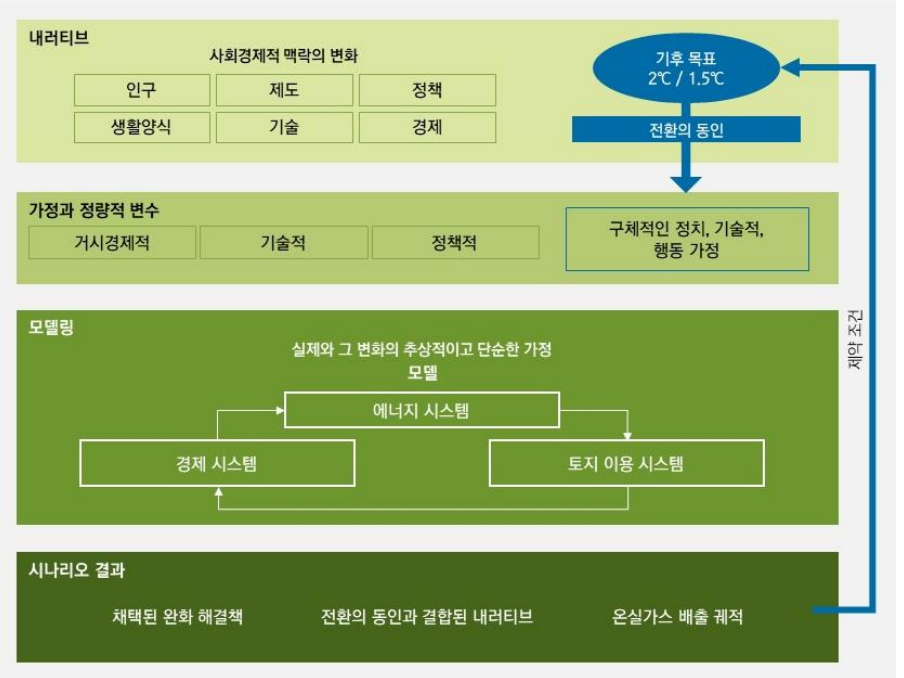
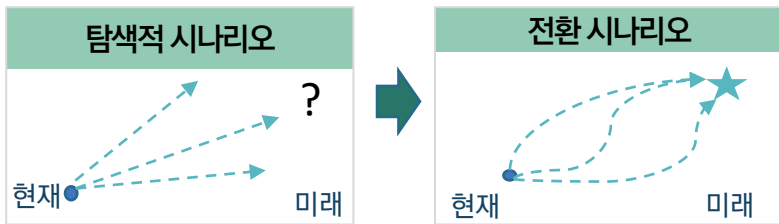
3. 기후변화 연구와 시나리오의 발전

전환시나리오

- 전환시나리오는 저탄소 전환 등 기후목표를 달성하기 위해 필요한 사회경제적 변화를 탐색
- 전환 시나리오는 온실가스 배출 제약과 같은 기후 목표 달성에 의해 제약을 받으므로 국제적 기후행동, 이용가능한 완화 해결책, 온실가스 배출 저감을 위한 정책 및 행동 변화, 배출 흡수 등 사회적 변화에 주목함

기후목표 함의에 따른 탄소중립/기후적응사회로의 전환 시작

- 탄소중립, 기후적응 등 사회적 전환을 통한 1.5°C 기후목표 달성을 위한 새로운 시나리오 개발 필요
- IPCC에서 새로운 시나리오 틀을 활용한 계획수립 및 이행평가를 요구
- 지속가능한 개발(SDGs)과 개별 기후 정책 간 상호작용 포함하여 폭 넓은 고려 필요



기후목표를 달성할 수 있는 구체적인 가정 및 모델링을 통해 사회경제적 변화를 탐색하는 **전환시나리오** 논의

3. 기후변화 연구와 시나리오의 발전

시나리오 개선 및 모델평가 결합(O' Neill et al., 2020)

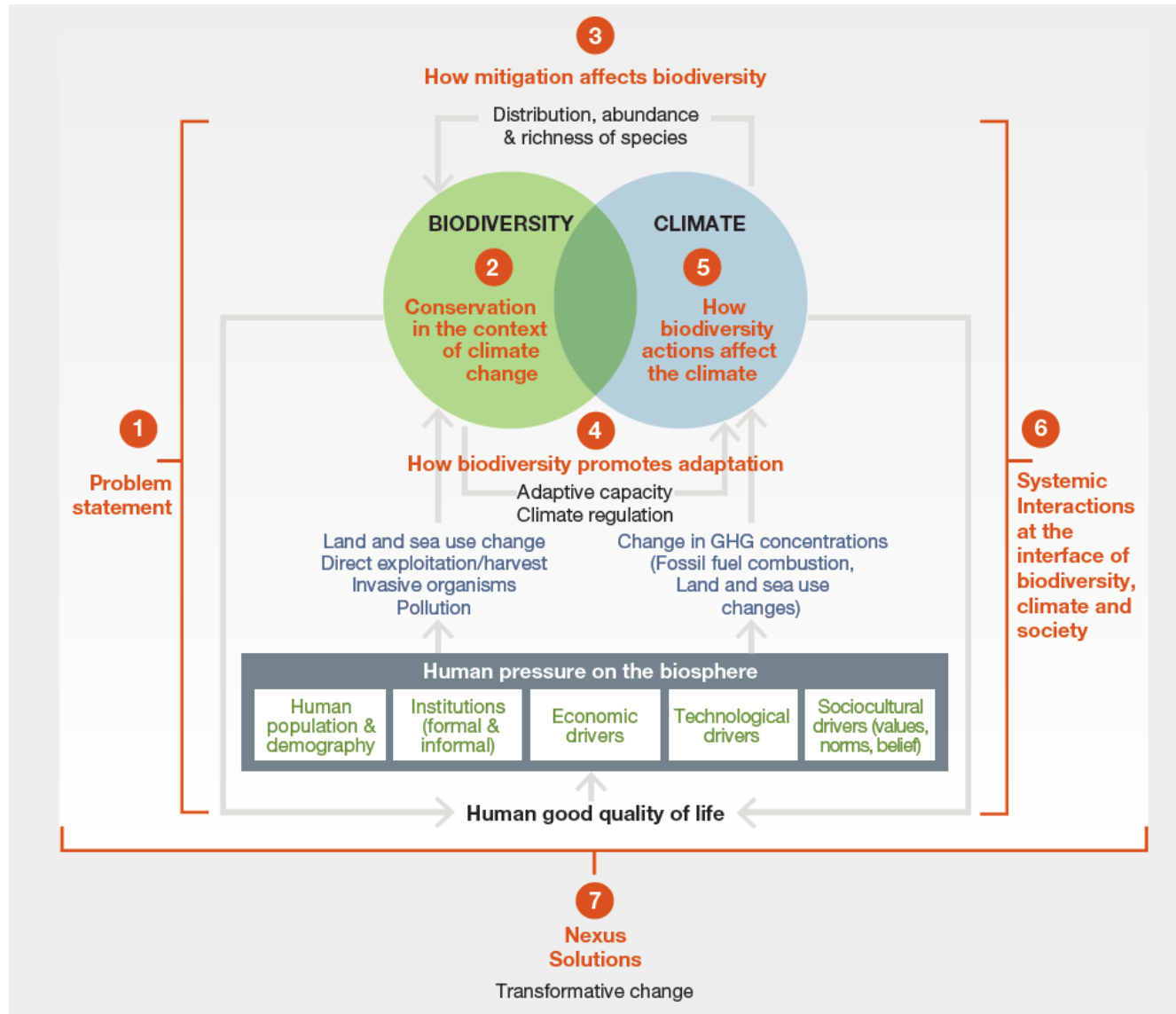
- SSP 내러티브와 통합평가모델(IAM)을 통해 완화 목표달성을 위한 사회경제적 경로 강조 필요
- 인구 및 GDP 정보 고해상도화를 통해 기후 위험 노출의 규모와 공간적 패턴을 식별하여 취약성 평가 지원 필요
- 이전 시나리오에서 지원하지 않았던 갈등, 거버넌스, 자원관리 등 다양한 범위의 분석 지원 필요
- 고해상도의 기후변화 영향평가결과를 바탕으로 기후변화 의사결정자가 적응 및 완화 경로를 개발할 수 있도록 지원

SSP-RCP 프레임워크 개선을 위한 이슈 및 권고사항

	기후/사회적 통합	지역적 적용가능성	기후 외 관련 증진	정책 연구 사용 증진	연관된 관점 포착	시나리오 최신화 유지	이용자 연계
현재 프레임워크 수정	취약성, 회복력 정량 지표 포함해 SSP 확장		SDGs, CBD 등 국제 목표를 포함하는 SSP 서술 확장 필요				
시나리오 개발 과정 개선	적응 경로 개발 및 물리적 기후 스토리 프레임워크 통합			적응과 완화를 위한 기후정책가정(SPAs) 정의 및 사용			
이용자-연구자 연결	SSP-RCP 연결				지역적 시나리오 개발 및 SSP의 사회적 목표 타당성 인식		
새로운 연구	향상된 지역 기후 정보 개발		사용자 요구 반영 및 학제간 협업을 위한 지침서 및 온라인 플랫폼 마련				
			시나리오의 미래 충격 설명력 고려 및 불확실성 범위 평가			기후 정책과 기후영향을 포함한 새로운 시나리오 개발	





















3. 기후변화 연구와 시나리오의 발전

토지연계 기후변화-생물다양성 모델링



3. 기후변화 연구와 시나리오의 발전

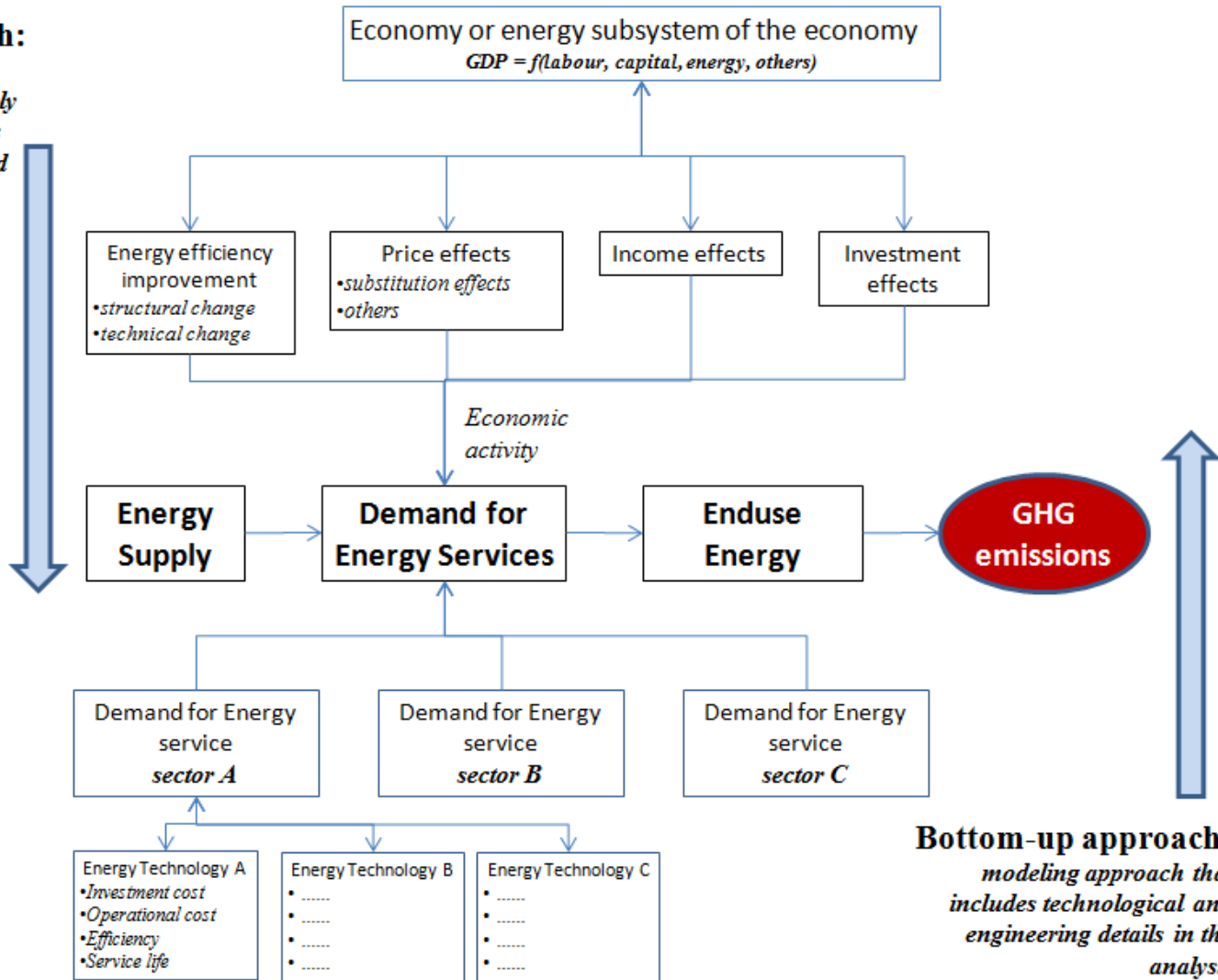
토지연계 기후변화-생물다양성 모델링

Practice	Summary/synopsis of overall expected impact	Mitigation potential	Adaptation potential (estimated number of people more resilient to climate change from intervention)	Biodiversity impact (positive unless otherwise stated)
A Land				
Increased food productivity		>13 GtCO ₂ e a ⁻¹	>163 million people	High ¹ or Low ²
Bioenergy and BECCS	 	0.4-11.3 GtCO ₂ e a ⁻¹	Potentially large negative consequences from competition for arable land and water	Negative/Low positive ³
Reforestation and forest restoration	  	1.5-10.1 Gt CO ₂ e a ⁻¹	> 25 million people	High
Afforestation	 	See Reforestation	Unclear	Negative/Low positive ³
Increased soil organic carbon content	  	0.4-8.6 GtCO ₂ e a ⁻¹	Up to 3200 million people	Medium
Fire management	 	0.48-8.1 GtCO ₂ e a ⁻¹	> 5.8 million people affected by wildfire; max. 0.5 million deaths per year by smoke	Low
Biochar addition to soil	 	0.03-6.6 GtCO ₂ e a ⁻¹	Up to 3200 million people; but potential negative (unquantified) impacts if arable land used for feedstock production	Low ⁴
Reduced deforestation and degradation	  	0.4-5.8 Gt CO ₂ e a ⁻¹	1-25 million people	High
Agroforestry	  	0.1-5.7 Gt CO ₂ e a ⁻¹	2300 million people	High

4. 기후완화 및 영향 통합 모델링

상향식/하향식 모델링 방식

Top-down approach:
modeling approach that proceeds from broad, highly aggregated generalizations to functional disaggregated details



Modified based on "Mapping the energy future", IEA, 1998

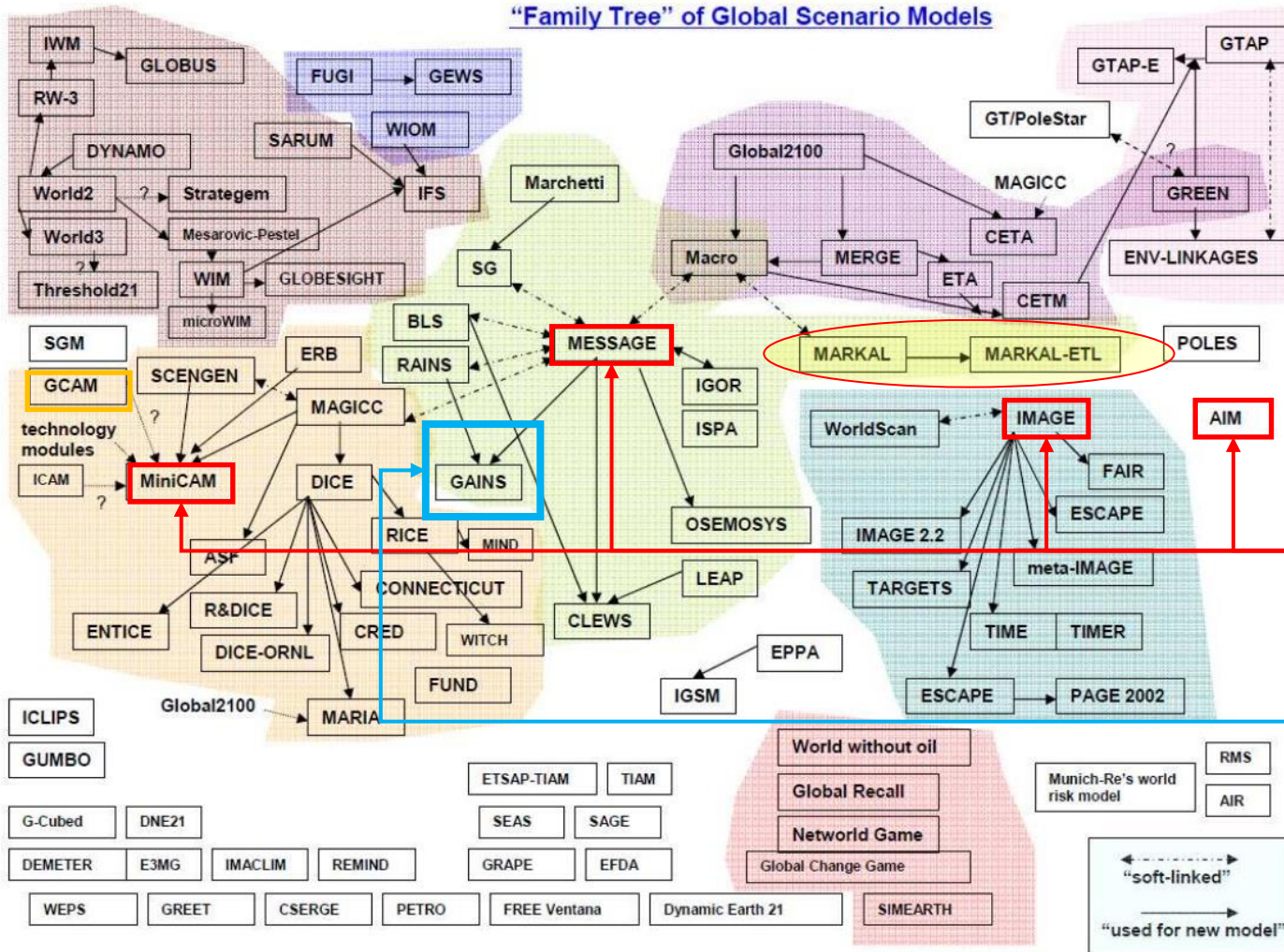
4. 기후완화 및 영향 통합 모델링

상향식/하향식 모델링 방식

Type of model		Explanation	AIM family	Other models/study
Abatement Cost Curve analysis		No explicit modelling structures; simply assess the costs of different technological options to reduce GHG emissions	AIM/Enduse[ACC]	McKinsey's ACC
Bottom-up models	Accounting type	Listing up externally prescribed GHG emission activities and suming up the associated GHG emission caused by the activities	AIM/Snapshot	STAIR, LEAP
	Sectoral optimization type	Technology-oriented models which minimize the total costs of the system,often applied to energy system including all end-use sectors, and compute a partial equilibrium for the markets. The costs include investment and operation costs of all sectors based on a detailed representation of factor costs and assumptions about GHG emission taxes	AIM/Enduse, AIM/AFOLU	MARKAL, MESSAGE
Top-down models	Input-Output type	Describing complex interrelationships among economic sectors using sets of simultaneous linear equations. The coefficients of equations are generally fixed, which means that factor substitution, technological change, and behavioural aspects related to climate change mitigation policies cannot be assessed. However, recent models, especially in ExSS, these restrictions are fully relaxed.	ExSS	TEESE
	Computable General Equilibrium (CGE)	Considering simultaneously all the markets in an economy,and calculating the conditions which permit their simultaneous equilibriums. The models typically simulate markets for factors of production (e.g., labour, capital, energy),products, and foreign exchange, with equations that specify supply and demand behaviour, under various LCD policies.	AIM/CGE	SGM, ENVISAGE
Hybrid of bottom-up and top-down models		Coupling of Bottom-up type and top-down type module	AIM/CGE[basic]	MERGE, IMACLIM-R

4. 기후완화 및 영향 통합 모델링

글로벌 모델



전세계에는 매우 다양한 CGE포함, 에너지를 기반으로 한 통합평가 모형들이 존재함.

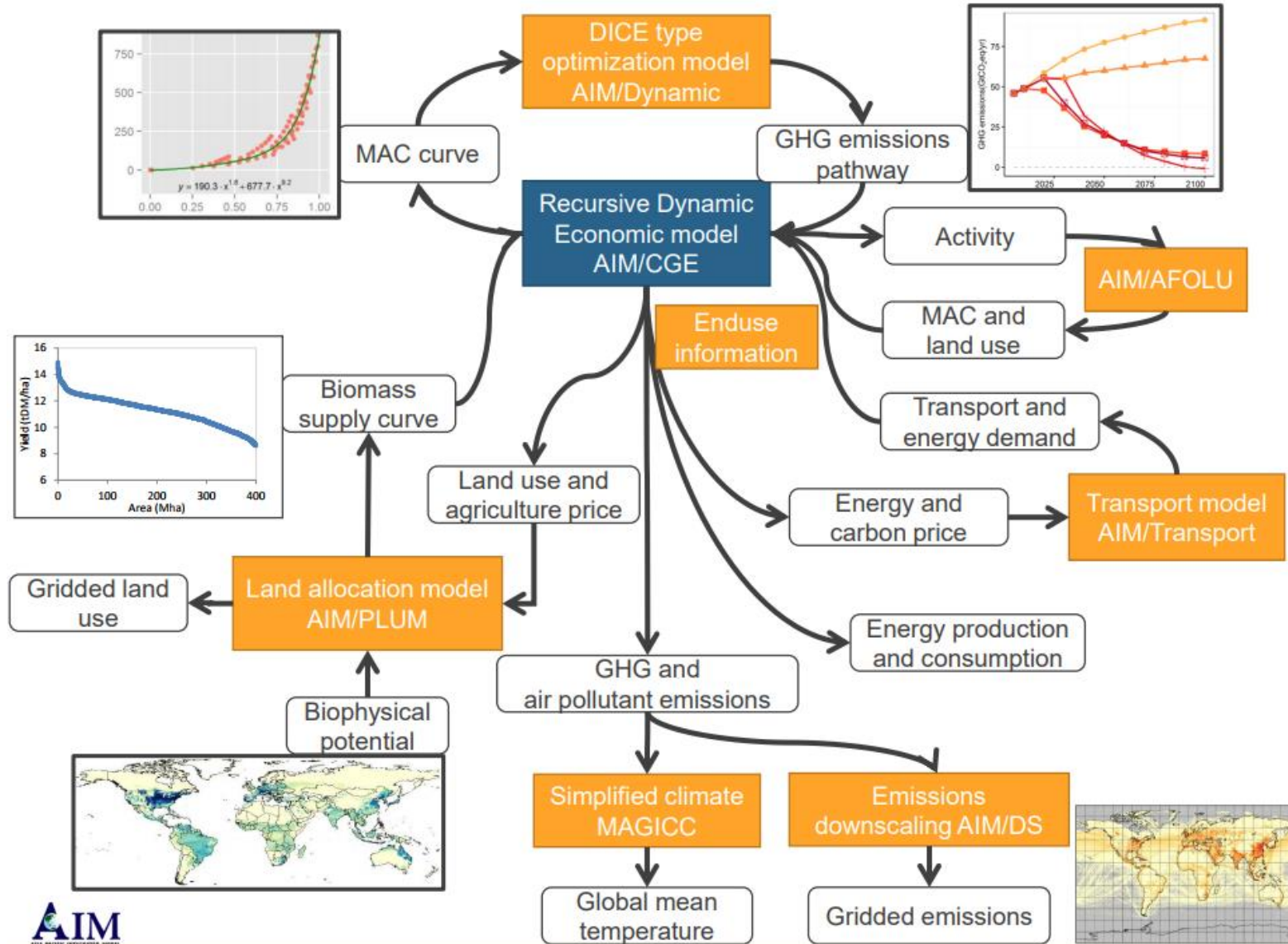
IEA 측에서 주로 사용하는 TIMES모형 외 IPCC에서 평가에 실제 활용하였던 4개 모형그룹 등 다양하게 운용되고 있음.

Models used for IPCC 5th Assessment Report

온실가스과 대기오염을 예측 및 건강/생태계 효과를 중심으로 인터페이스를 개편한 버전임

4. 기후완화 및 영향 통합 모델링

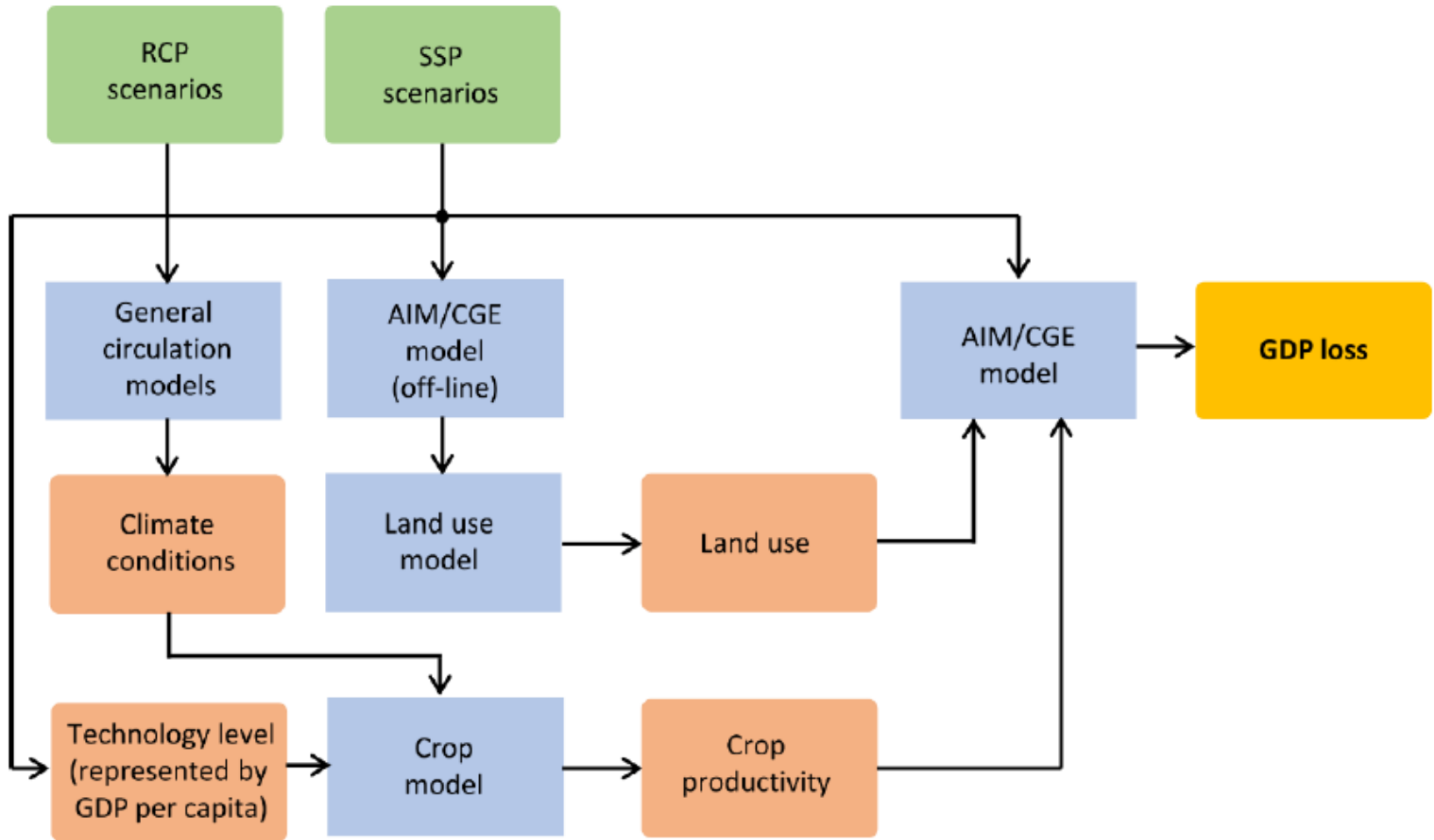
AIMHUB기반 모델링 구조



4. 기후완화 및 영향 통합 모델링

AIMHUB기반 기후영향 연계구조

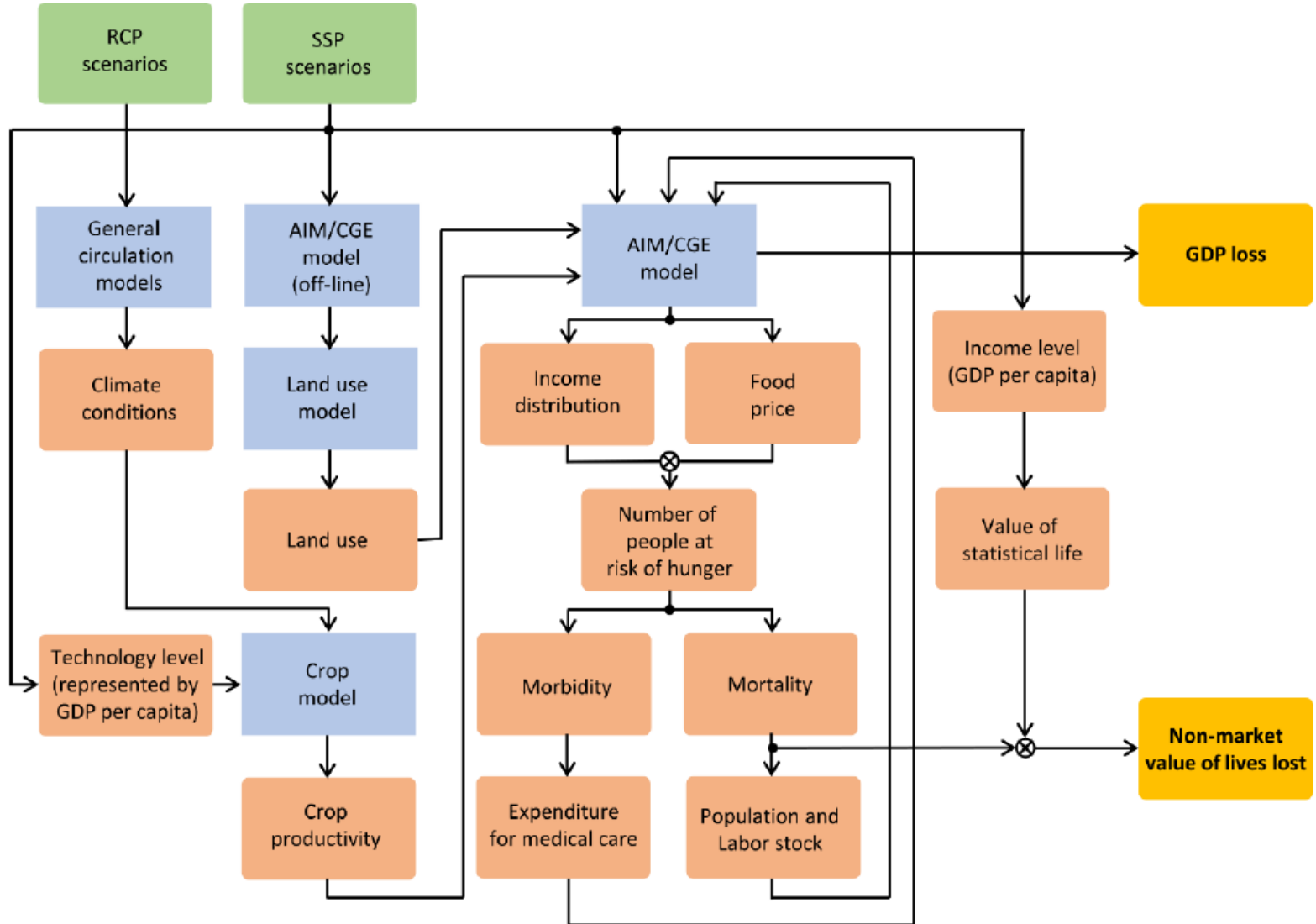
농업 기후영향 (직접)



4. 기후완화 및 영향 통합 모델링

AIMHUB기반 기후영향 연계구조

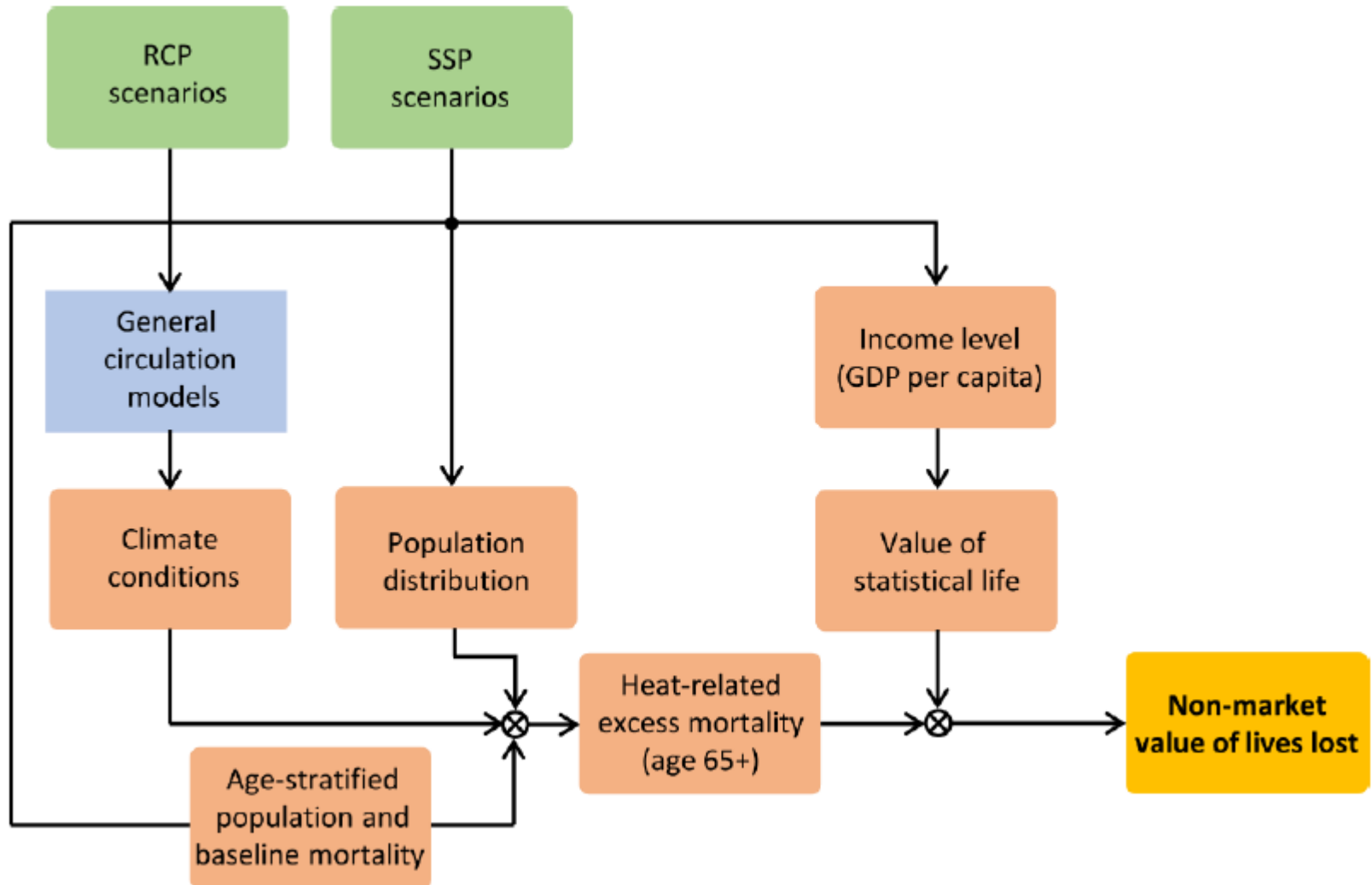
농업 기후영향(2차 영향)



4. 기후완화 및 영향 통합 모델링

AIMHUB기반 기후영향 연계구조

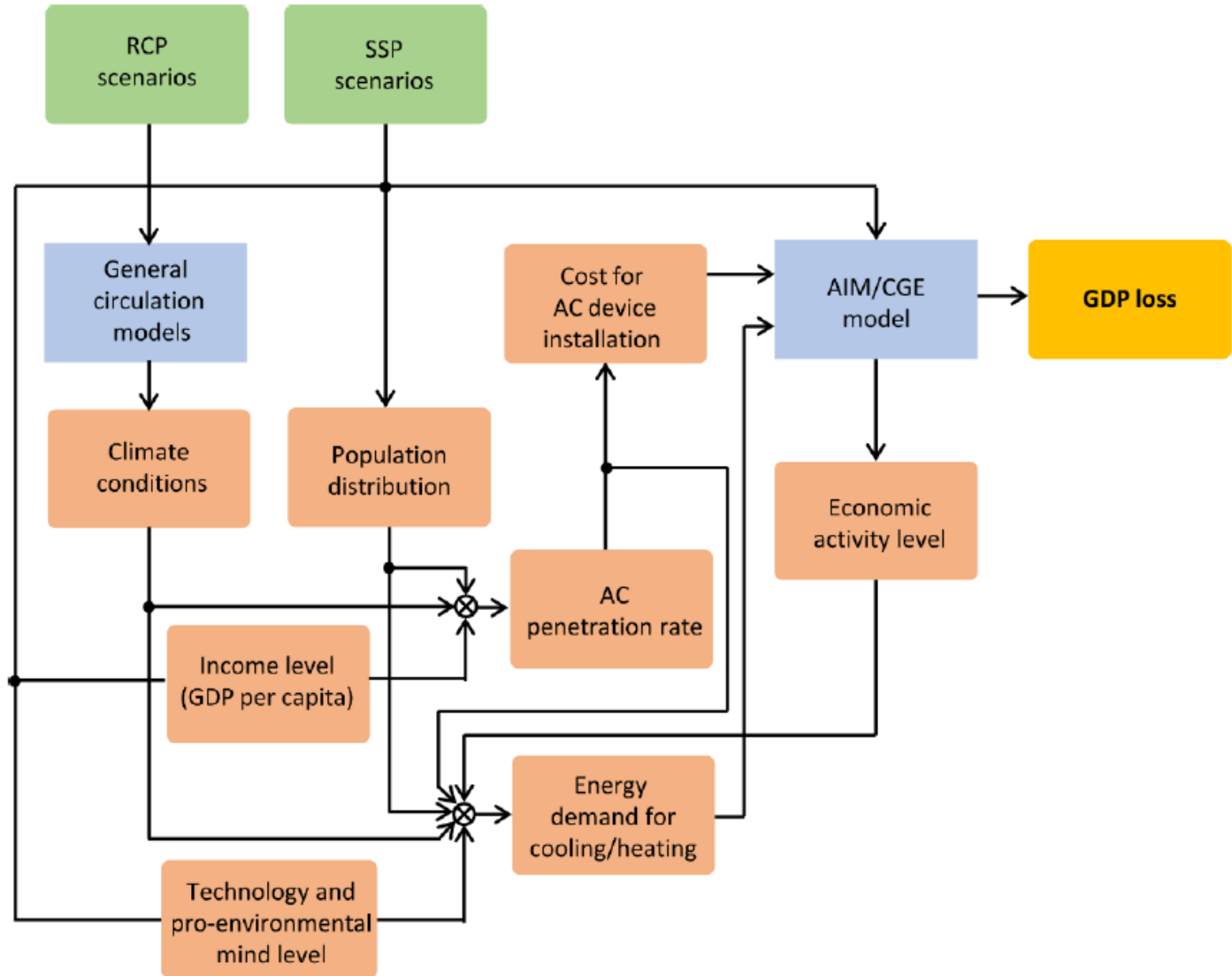
열 관련 영향



4. 기후완화 및 영향 통합 모델링

AIMHUB기반 기후영향 연계구조

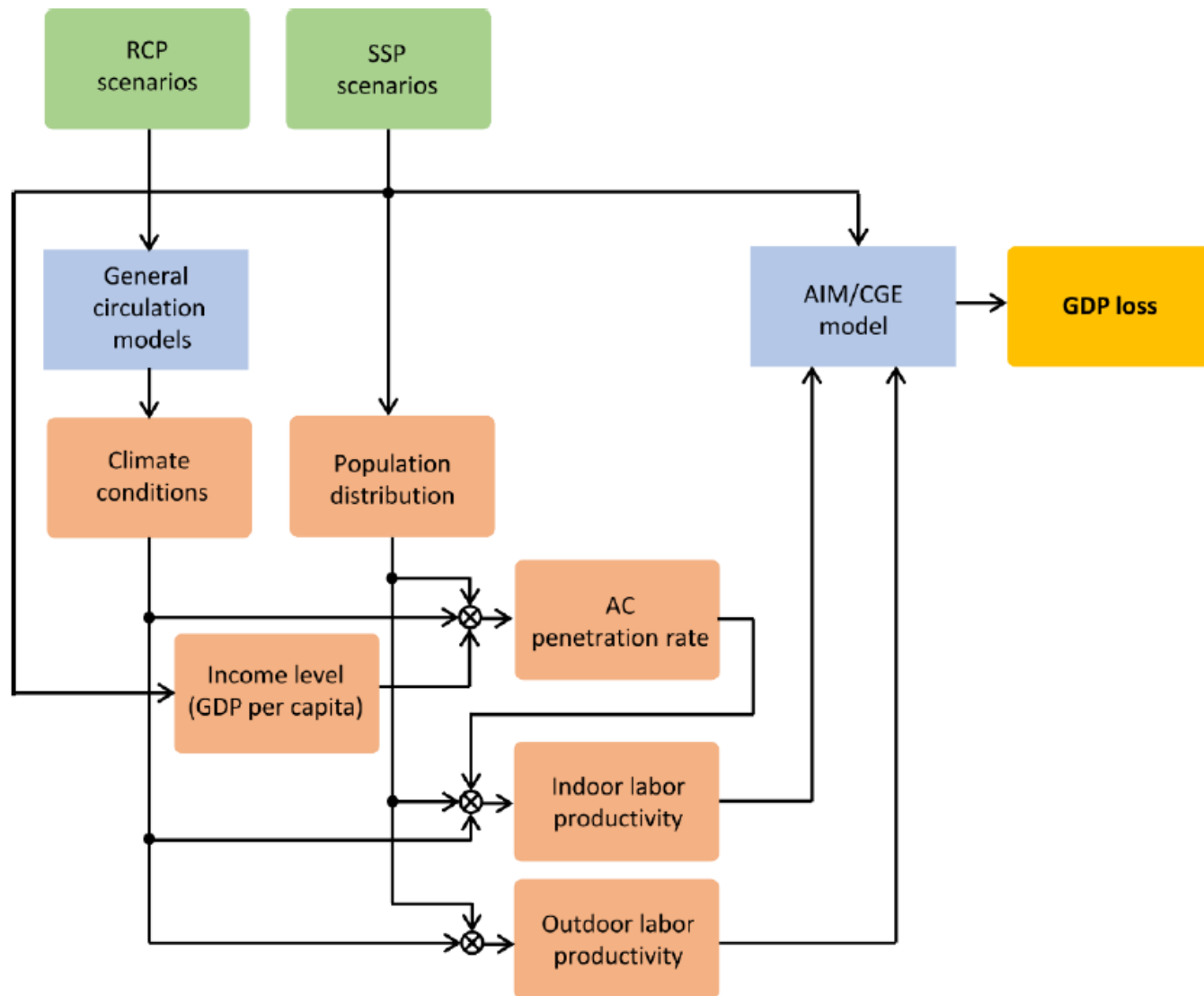
냉난방



4. 기후완화 및 영향 통합 모델링

AIMHUB기반 기후영향 연계구조

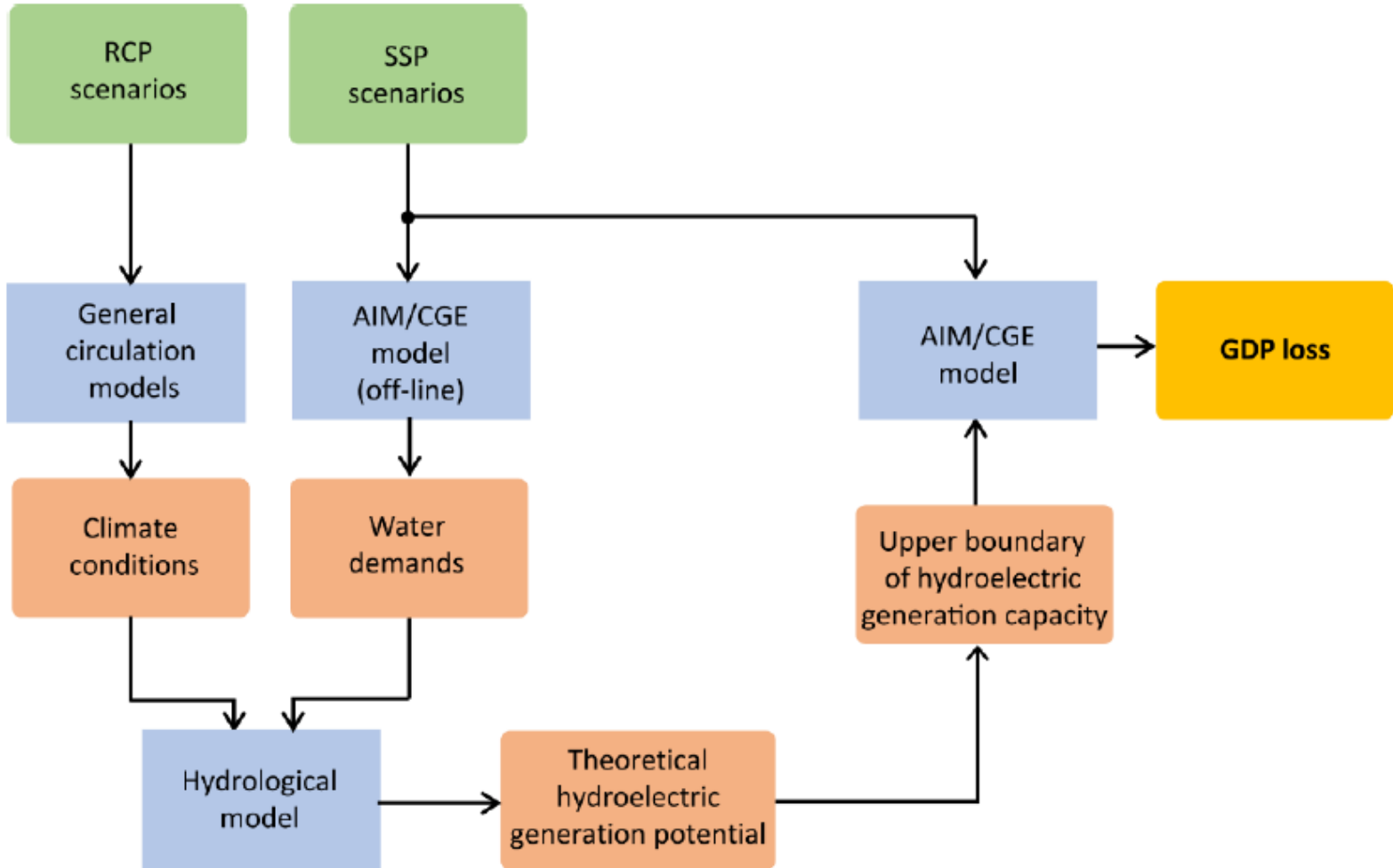
노동생산성



4. 기후완화 및 영향 통합 모델링

AIMHUB기반 기후영향 연계구조

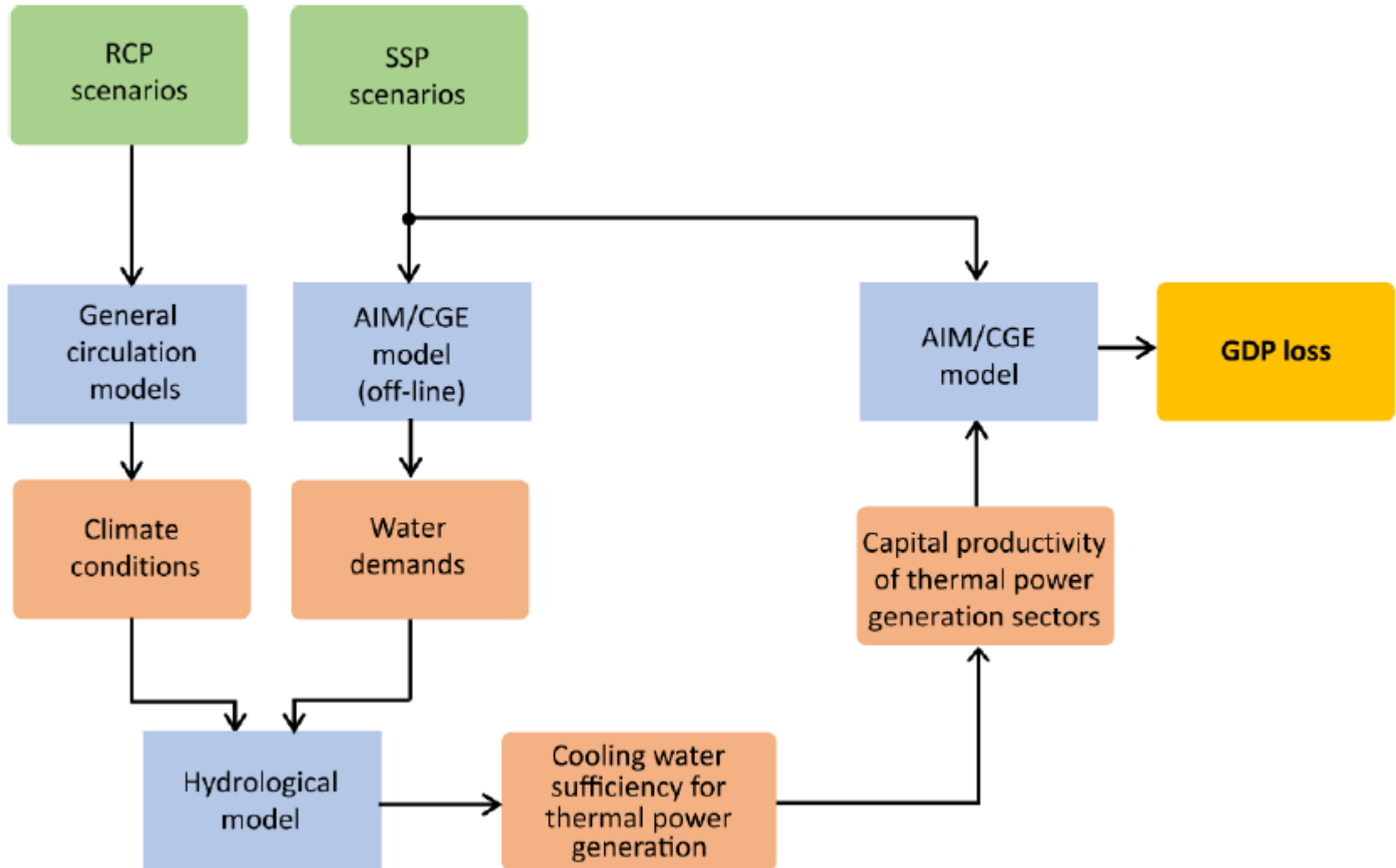
수력발전



4. 기후완화 및 영향 통합 모델링

AIMHUB기반 기후영향 연계구조

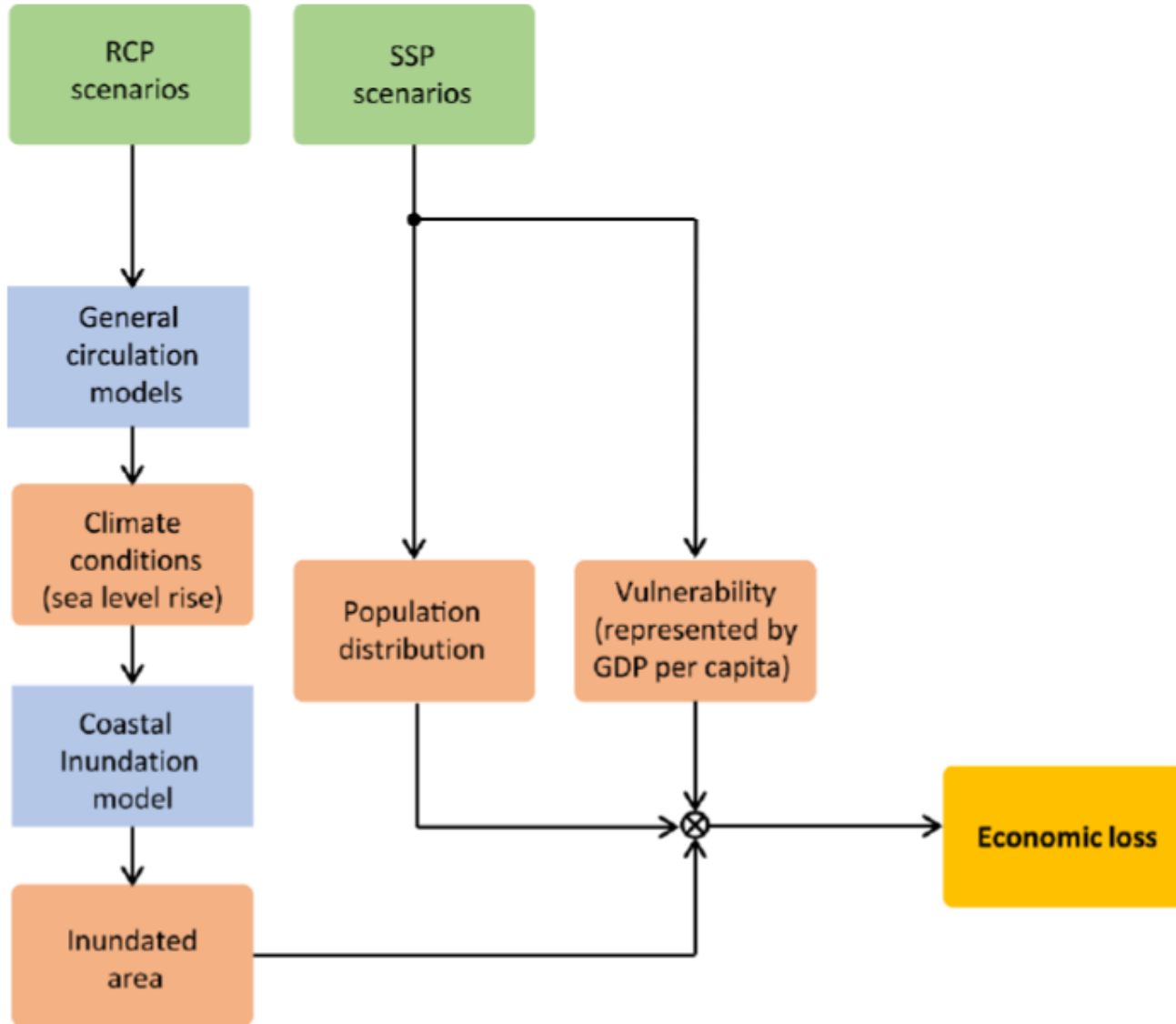
수력발전



4. 기후완화 및 영향 통합 모델링

AIMHUB기반 기후영향 연계구조

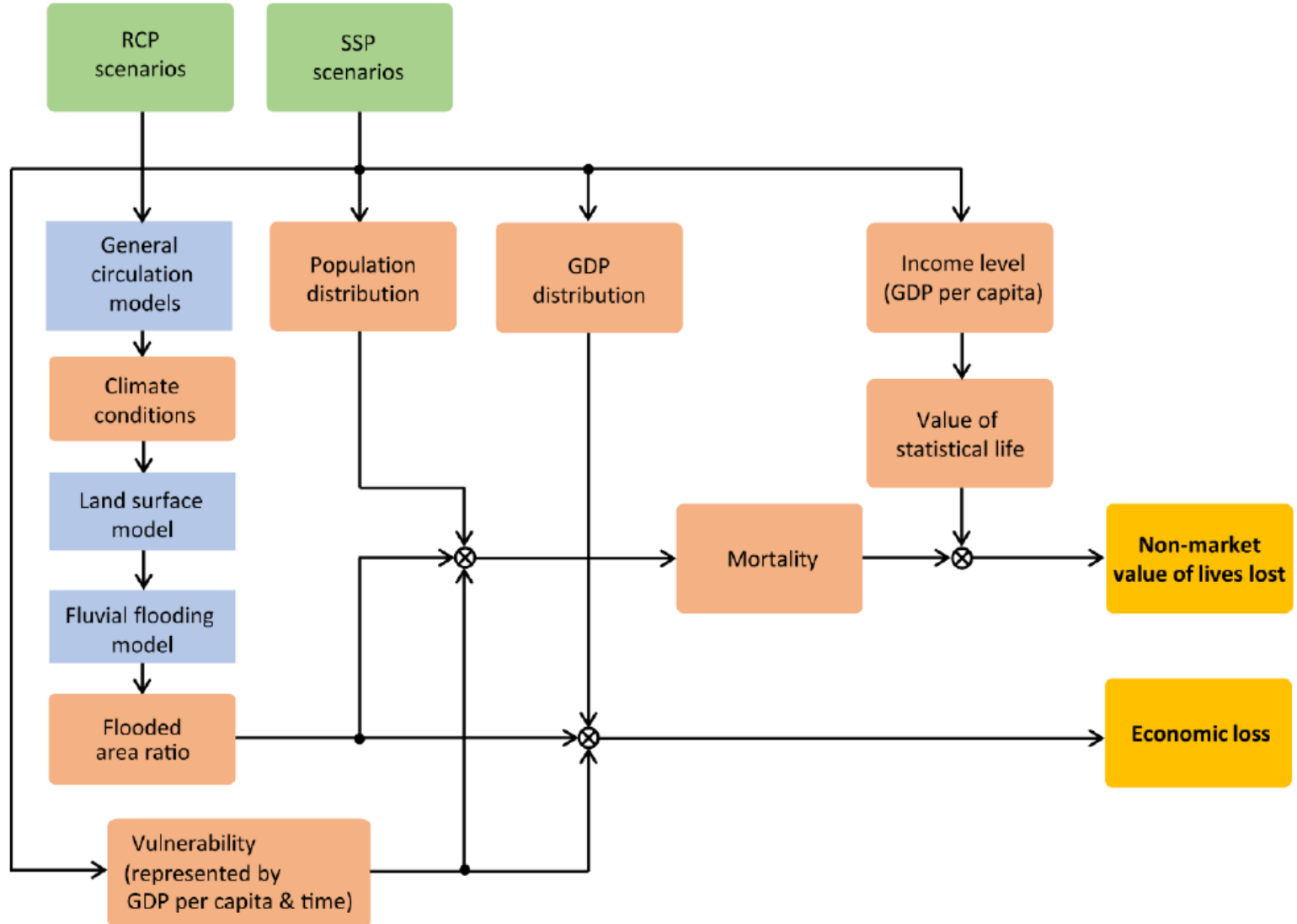
해수면상승



4. 기후완화 및 영향 통합 모델링

AIMHUB기반 기후영향 연계구조

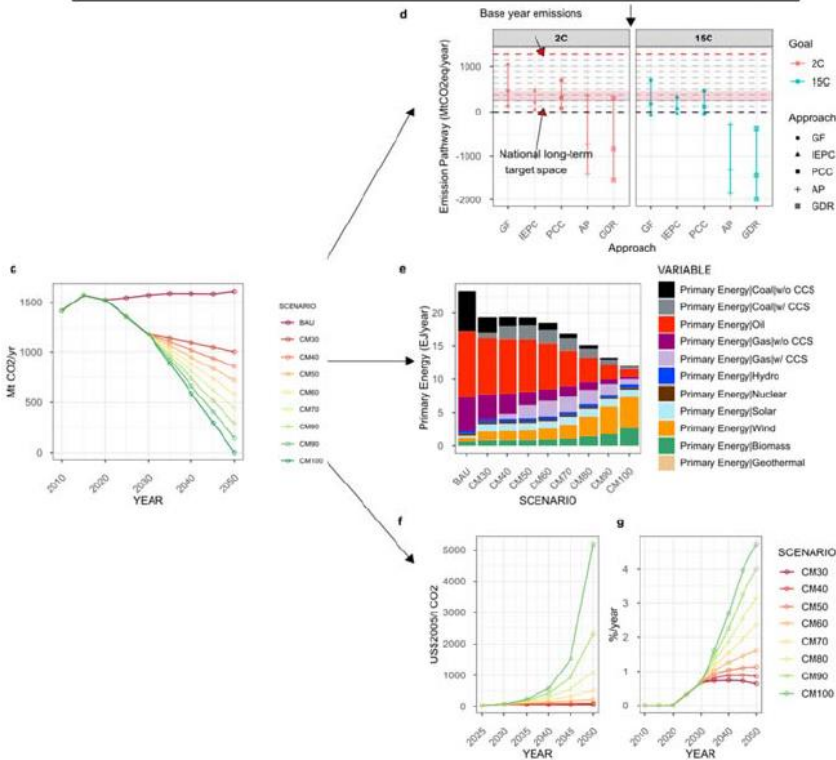
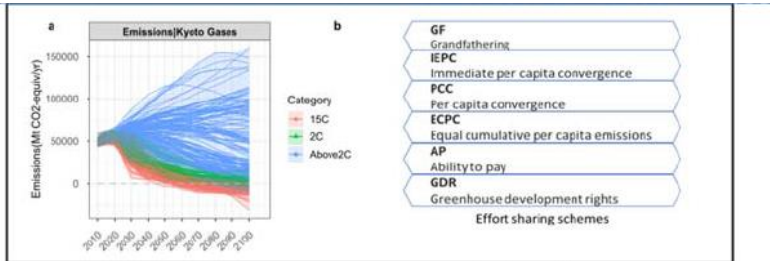
홍수



5. 모델링 사례

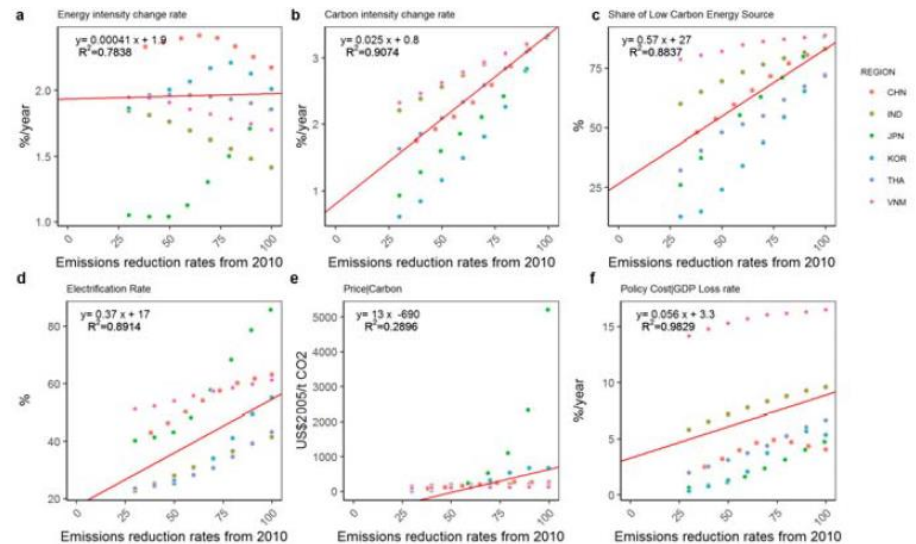
AIMHUB기반 LEDS 평가

- A new national scenario framework: National Long-term Pathways (NLPs) (Nature Climate Change)



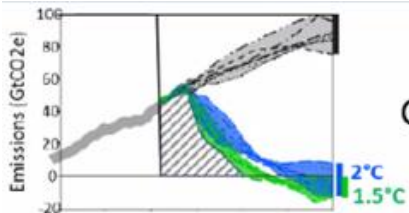
Expected criteria for upcoming national scenarios

- Cross-national comparability
- Compatibility and cohesion with global climate goals
- Policy relevance
- Ability to address critical national target uncertainties
- Simple implementation without ambiguities in the interpretation of the modeling protocol

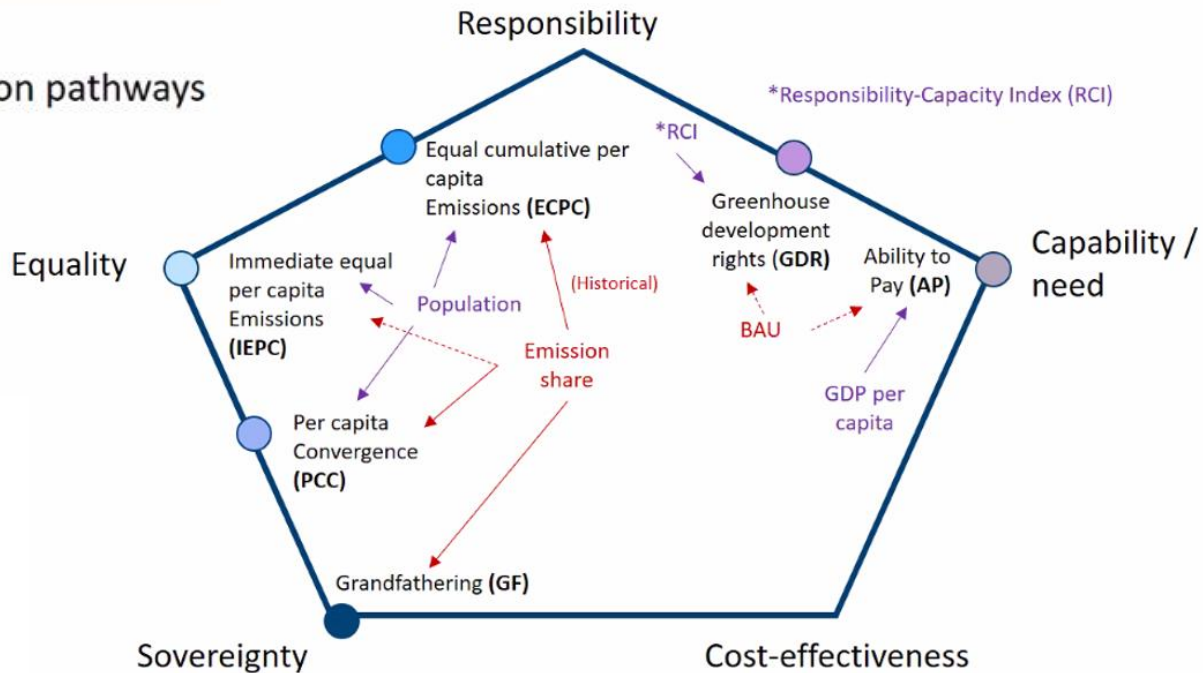


5. 모델링 사례

AIMHUB기반 글로벌 1.5도 탄소예산에 따른 탄소중립경로 분석

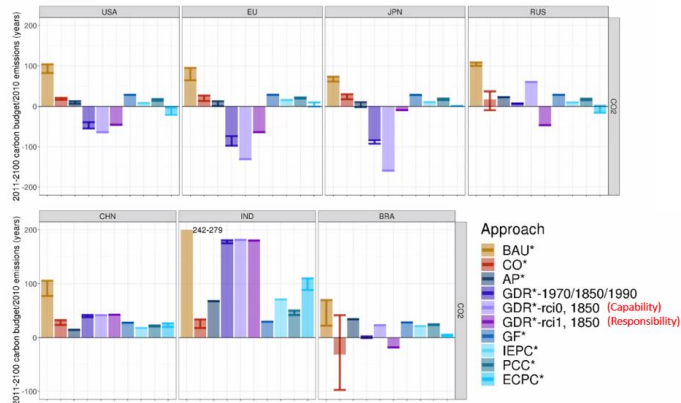


Global emission pathways



Adapted from (Höhne et al. 2013)

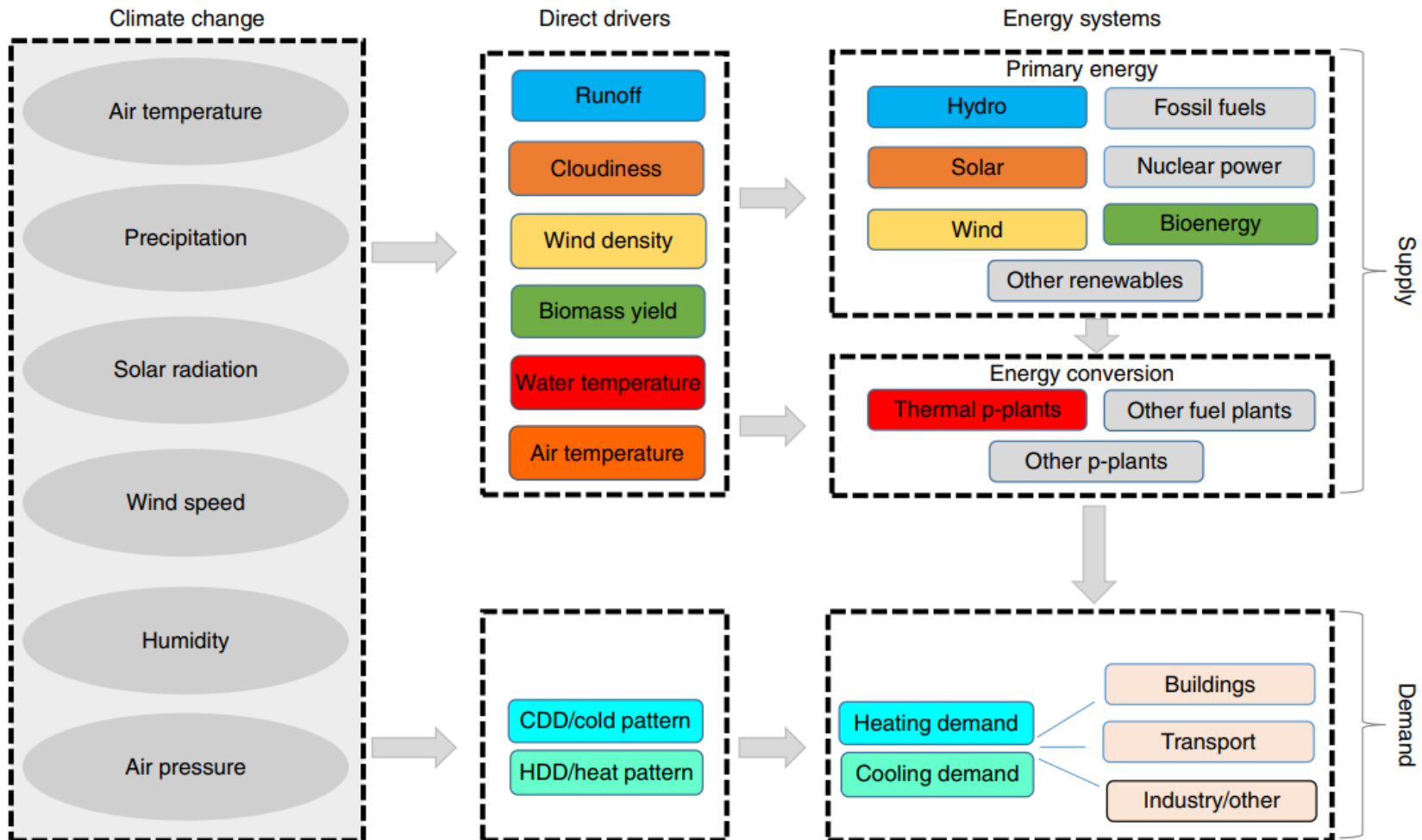
Carbon budget approach
2011-2100/2010 emissions (in years)



5. 모델링 사례

AIMHUB기반 에너지발전부문 영향평가

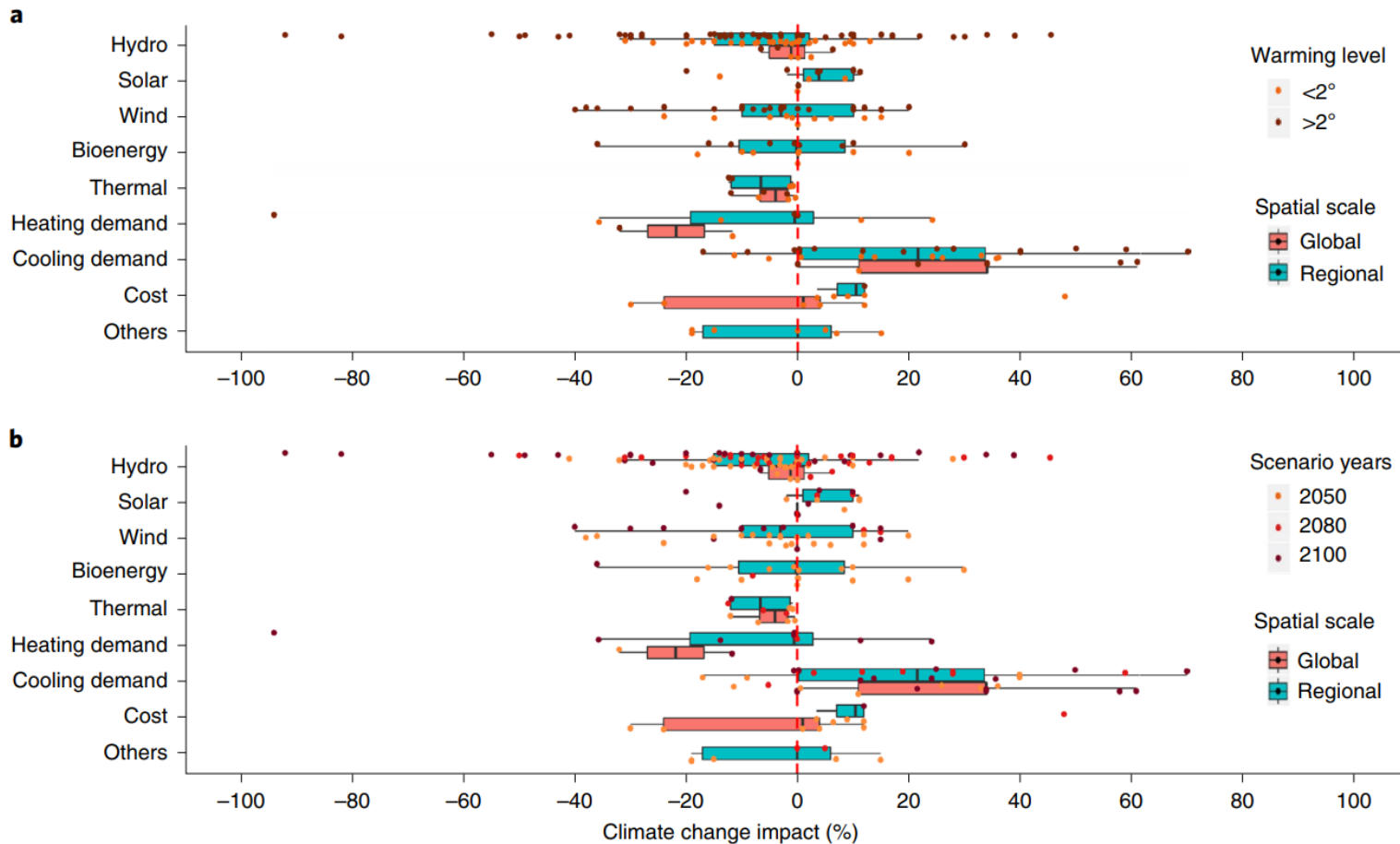
- Impacts of climate change on energy systems in global and regional scenarios (Nature Energy)



5. 모델링 사례

AIMHUB기반 에너지발전부문 영향평가

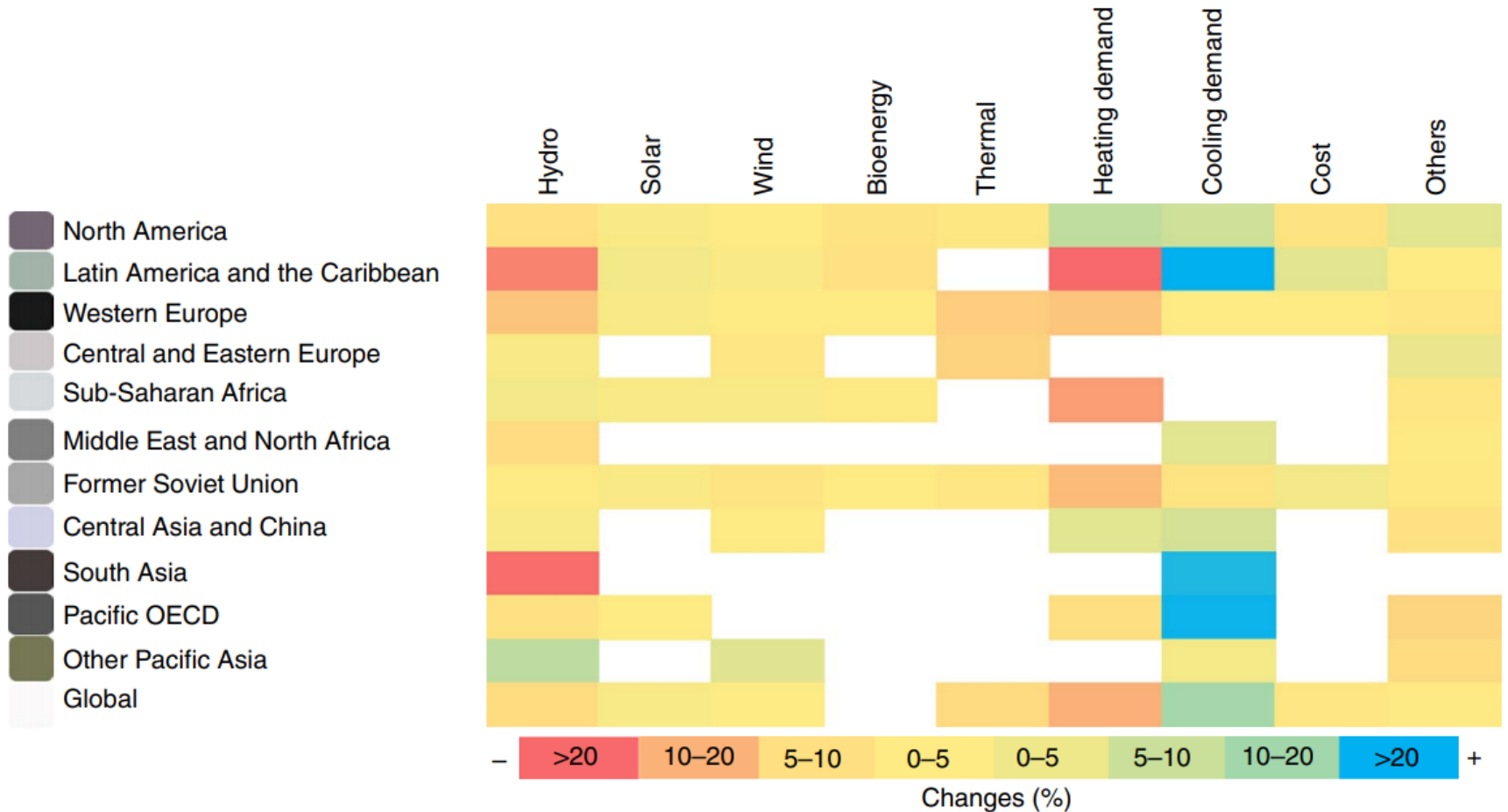
- Impacts of climate change on energy systems in global and regional scenarios (Nature Energy)



5. 모델링 사례

AIMHUB기반 에너지발전부문 영향평가

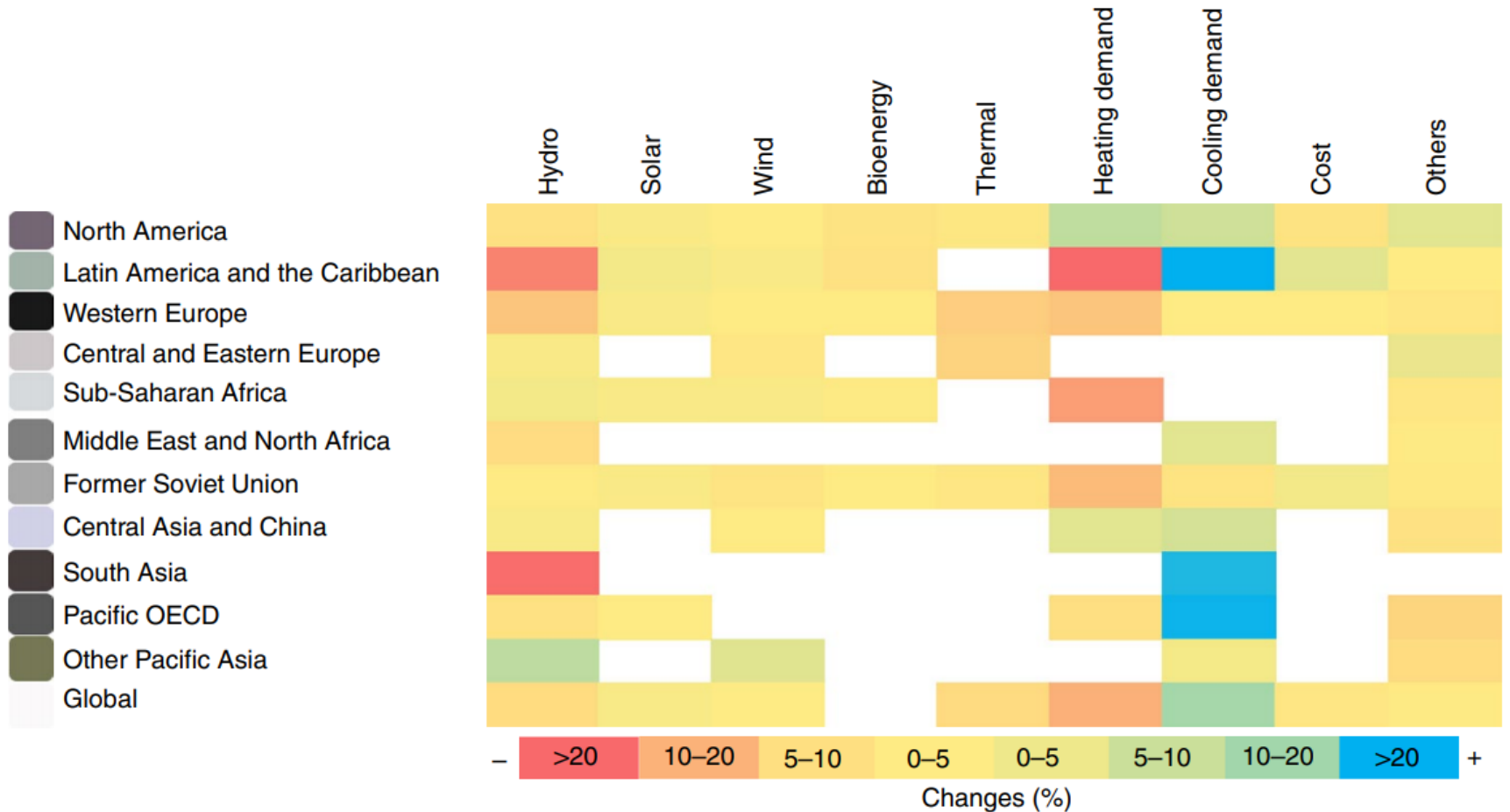
- Impacts of climate change on energy systems in global and regional scenarios (Nature Energy)



5. 모델링 사례

AIMHUB기반 에너지발전부문 영향평가

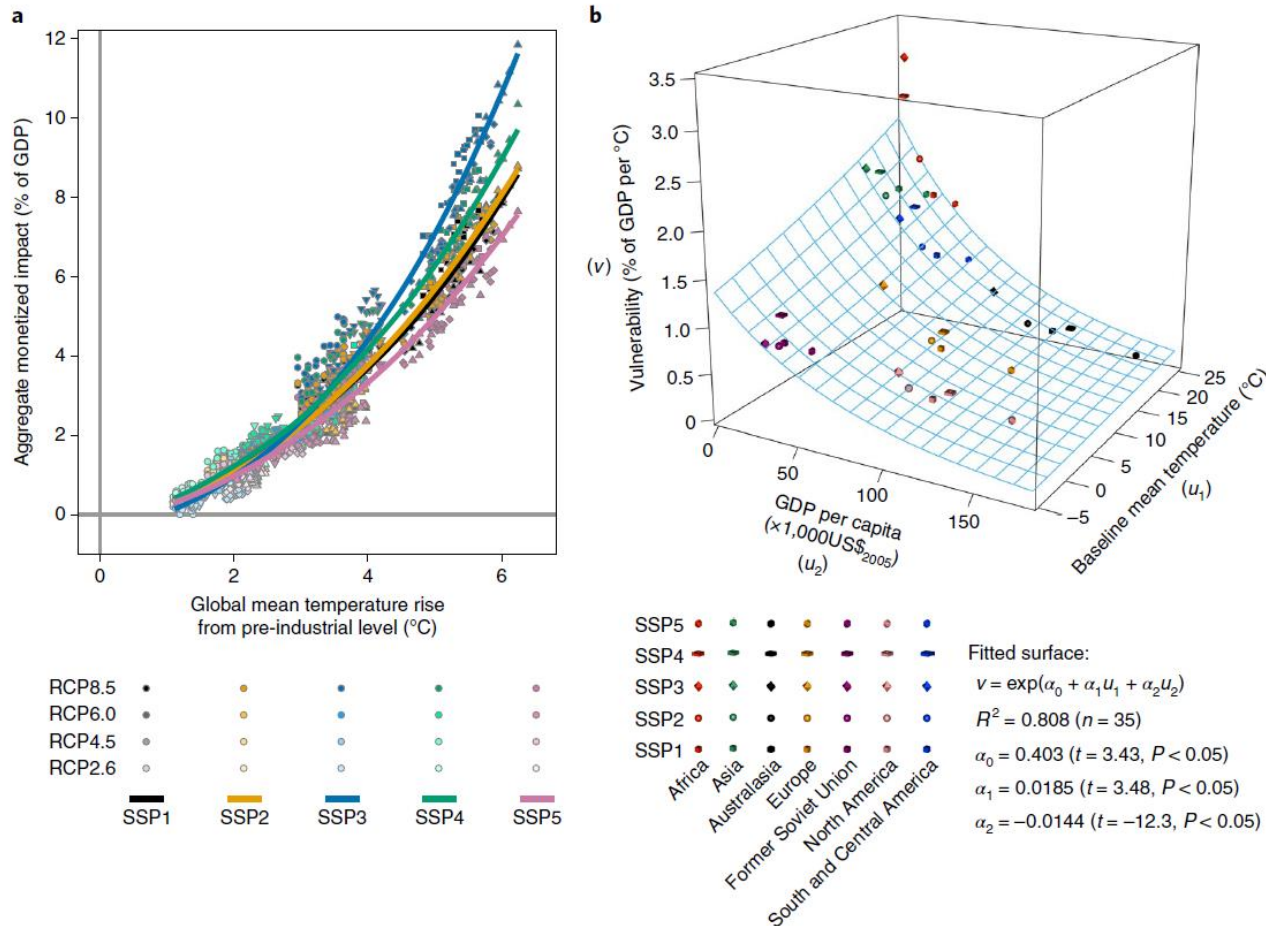
- Impacts of climate change on energy systems in global and regional scenarios (Nature Energy)



5. 모델링 사례

AIMHUB기반 기후변화 경제영향의 경로의존성 분석

- Dependence of economic impacts of climate change on anthropogenically directed pathways(Nature Climate Change)



5. 모델링 사례

AIMHUB기반 기후변화 경제영향의 경로의존성 분석

- Dependence of economic impacts of climate change on anthropogenically directed pathways(Nature Climate Change)

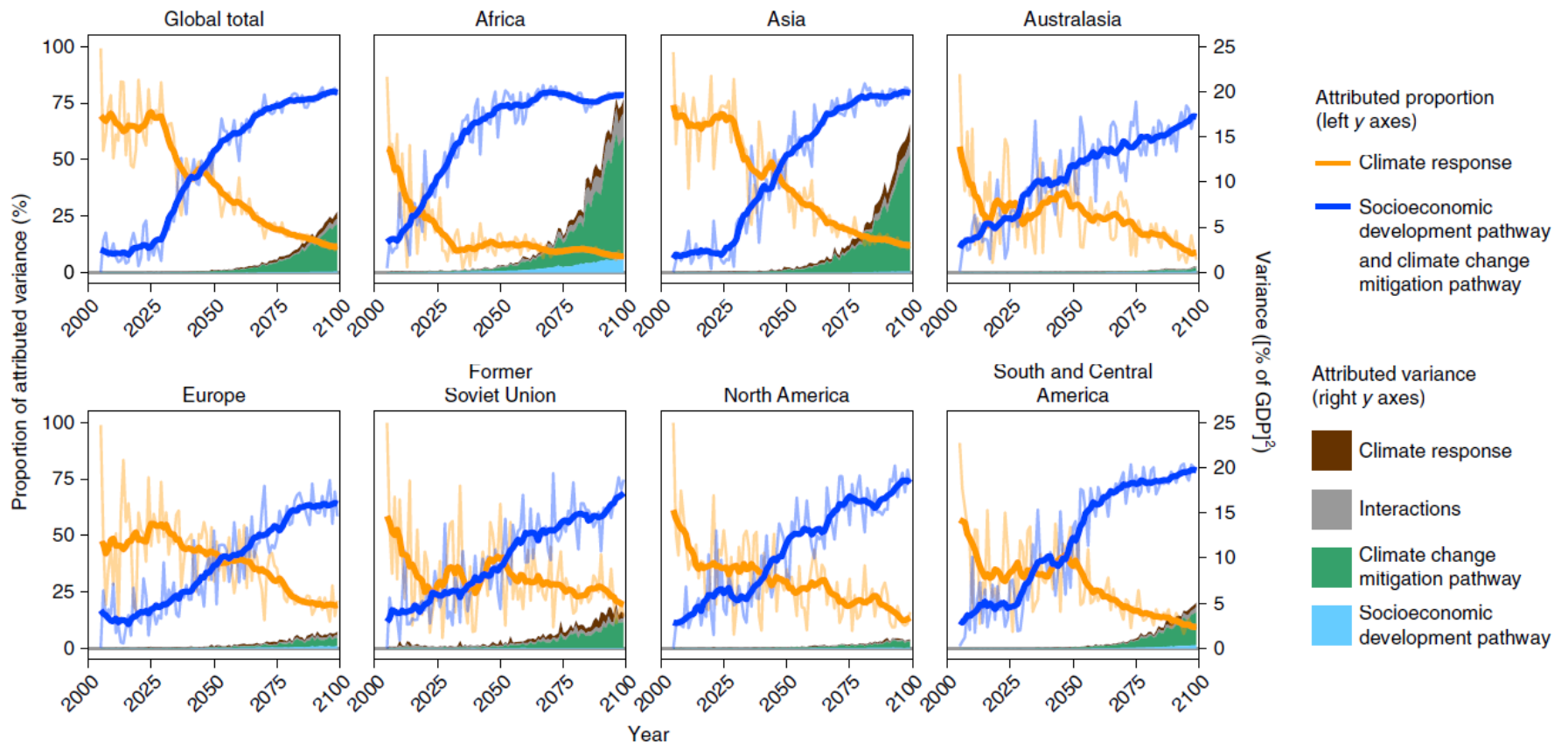


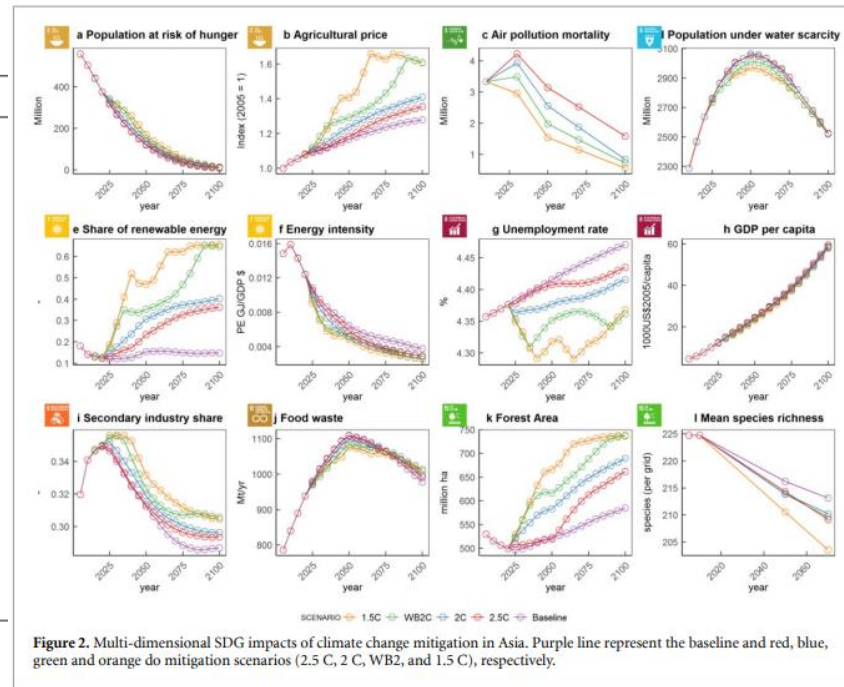
Fig. 2 | Variance of the projected impact attributed to each factor.

5. 모델링 사례

AIMHUB기반 기후완화와 SDG와의 연계성 분석

Fujimori et al., 2020, Measuring the sustainable development implications of climate change mitigation, ERL

SDGs	Field	Indicators (SDG targets)	Unit	Model
SDG2	Hunger	Population at risk of hunger (2.1)	Person	AIM/Hub + Hunger tool
		Agricultural price (2.c)	No unit	AIM/Hub
SDG3	Health	Air pollution mortality (3.9.1)	Person	AIM/Hub + GEOS-Chem + Health assessment tool
SDG6	Water	Population under water scarcity (6.4.2)	Person	AIM/Hub + Water assessment tool
		Share of renewable energy (in primary energy) (7.2.1)	Ratio	AIM/Hub
SDG7	Energy	Energy intensity (7.3.1)	GJ/\$	AIM/Hub
SDG8	Labour	GDP per capita (8.1.1)	2005US\$/cap	AIM/Hub
		Unemployment rate (8.5.2)	%	
SDG9	Economy	Secondary industry share (9.2.1)	Ratio	AIM/Hub AIM/Hub
SDG12	Consumption	Food waste (12.3.1)	Mt/year	AIM/Hub
SDG15	Life on land	Forest area (15.1.1)	Area	AIM/Hub
		Mean species richness (15.5: Biodiversity index)	Species per grid cell	AIM/Hub + AIM/PLUM + AIM/Biodiversity



5. 모델링 사례

시나리오 프레임 활용사례

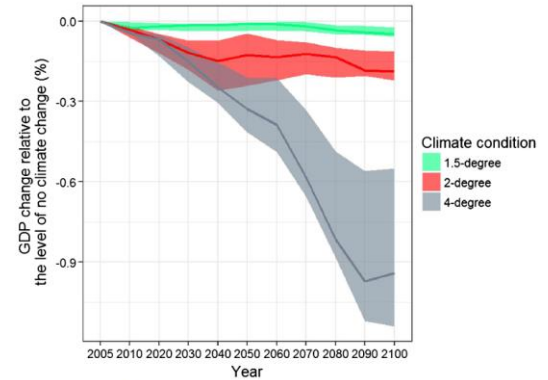


Figure 2. Changes in GDP due to changes in demand for space heating and cooling under different climatic conditions in SSP2. GDP changes are shown as changes from the level without any climate change. The lines show median values, and the ranges represent the uncertainty ranges of the General Circulation Models (GCMs). See supplementary information for regional GDP changes.

Table 2. Simulation framework.

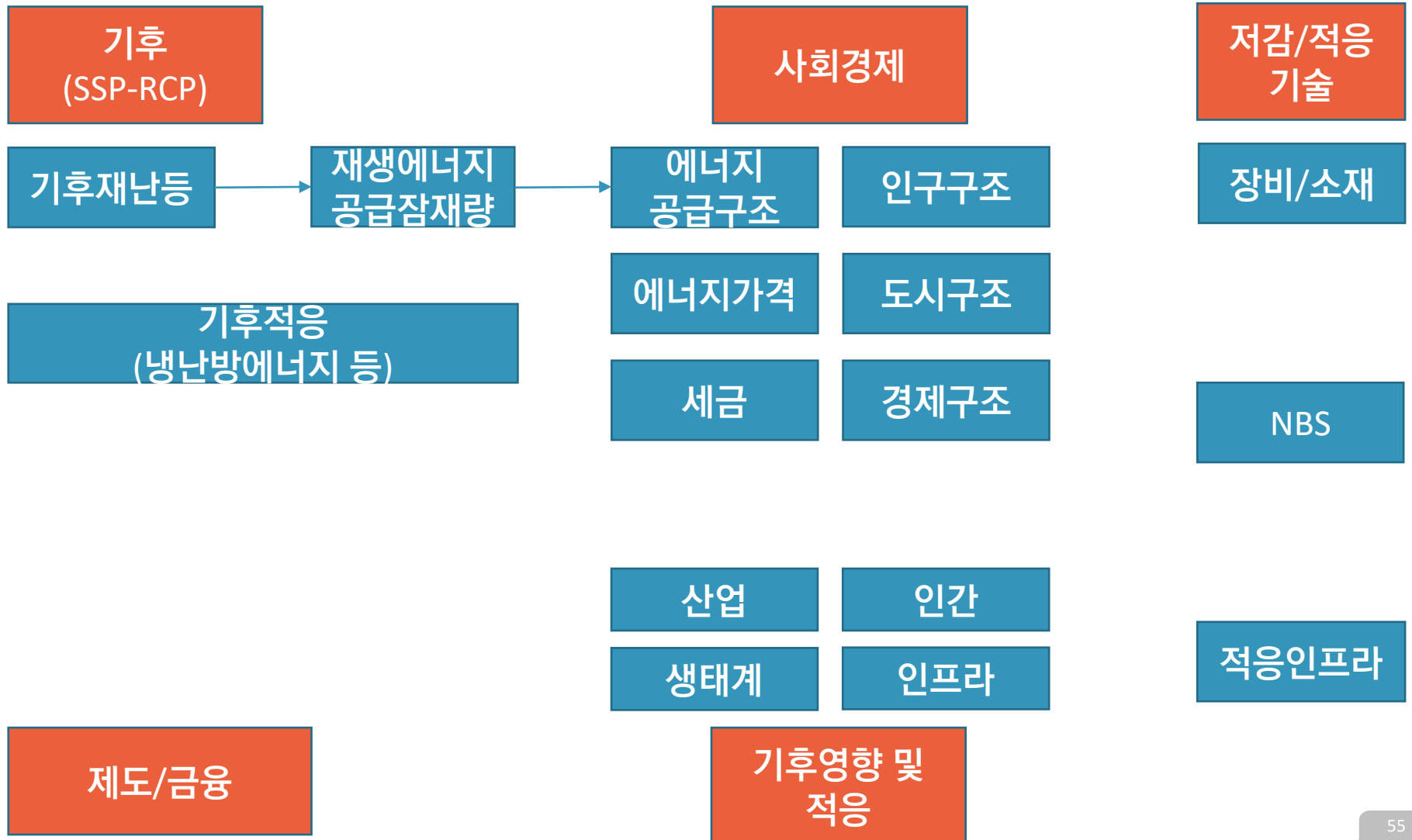
Simulation objective	SSPs	Climate condition
Climate impact and 1.5 °C scenario	SSP2	1.5 °C/2.0 °C/4.0 °C/ No climate change
The effect of socioeconomic assumptions	SSP1/SSP2/SSP3	1.5 °C/2.0 °C/4.0 °C/ No climate change
Sensitivity of adaptive level to climate change for heating and cooling	SSP2(3 different HDD/CDD threshold condition)	

Table 3. List of parameters and their assumptions for socioeconomic conditions.

Parameter	Population and GDP assumption	HDD(H)/CDD(C) threshold (°C)	Autonomous energy efficiency improvement
SSP1	SSP1 database (Low population growth and high economic growth)	15/26	0.1%
SSP2	SSP2 database (Sustainable population and economic growth)	18/22	0.05%
SSP3	SSP3 database (High population growth and low economic growth)	20/18	0.025%

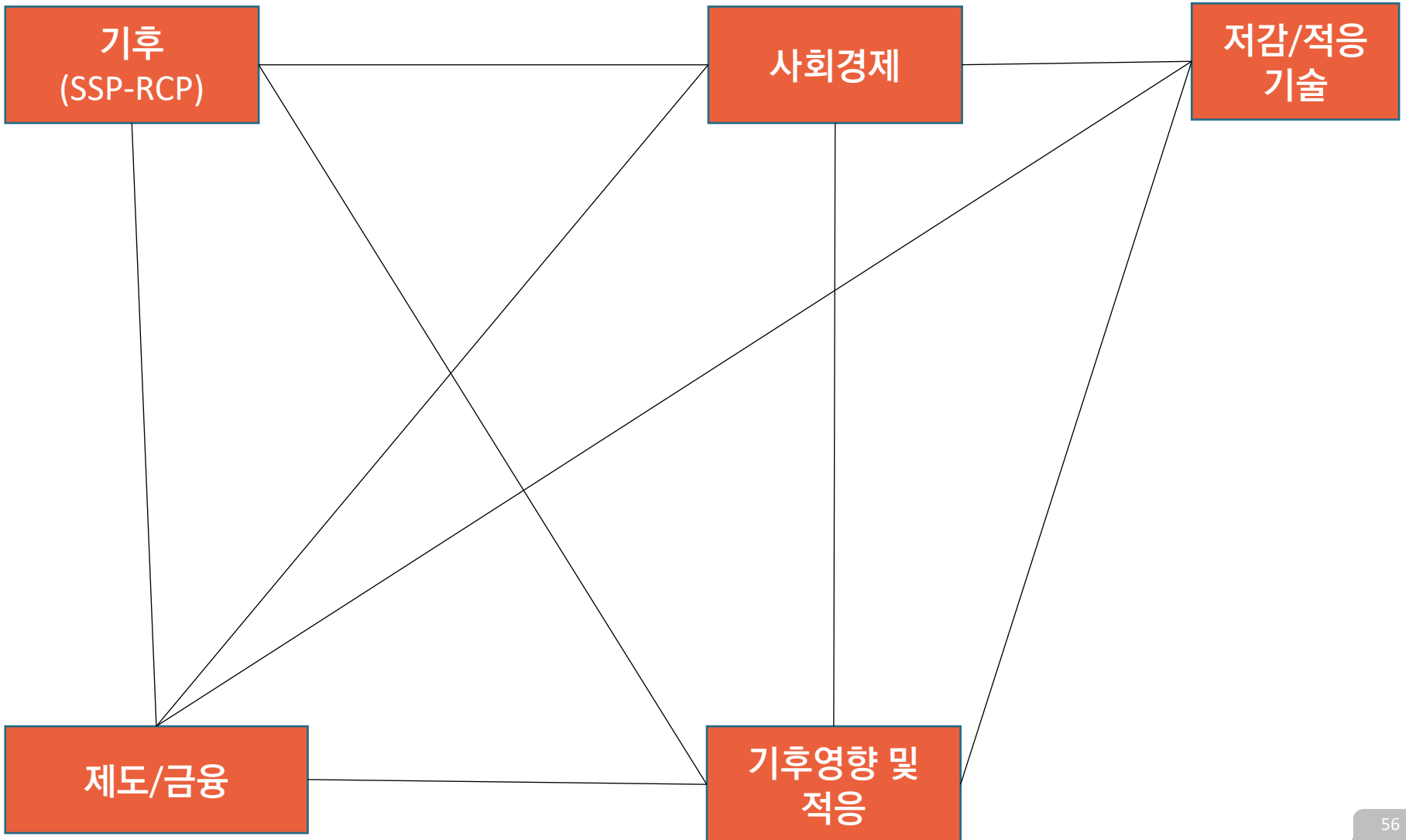
6. 시나리오&모델링 개발 이슈

기후완화/적응 연계 모델링 이슈



6. 시나리오&모델링 개발 이슈

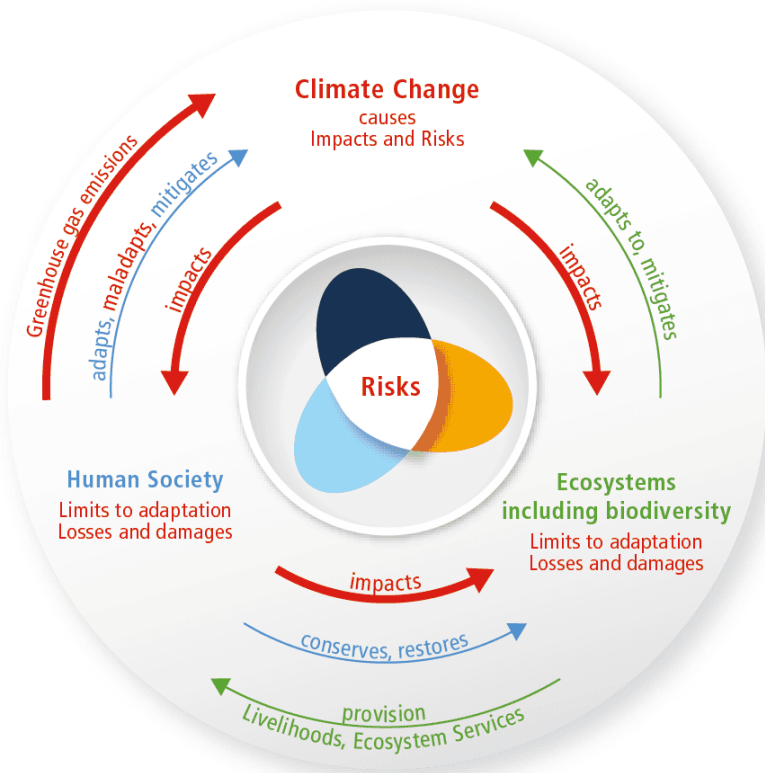
기후완화/적응 연계 모델링 이슈



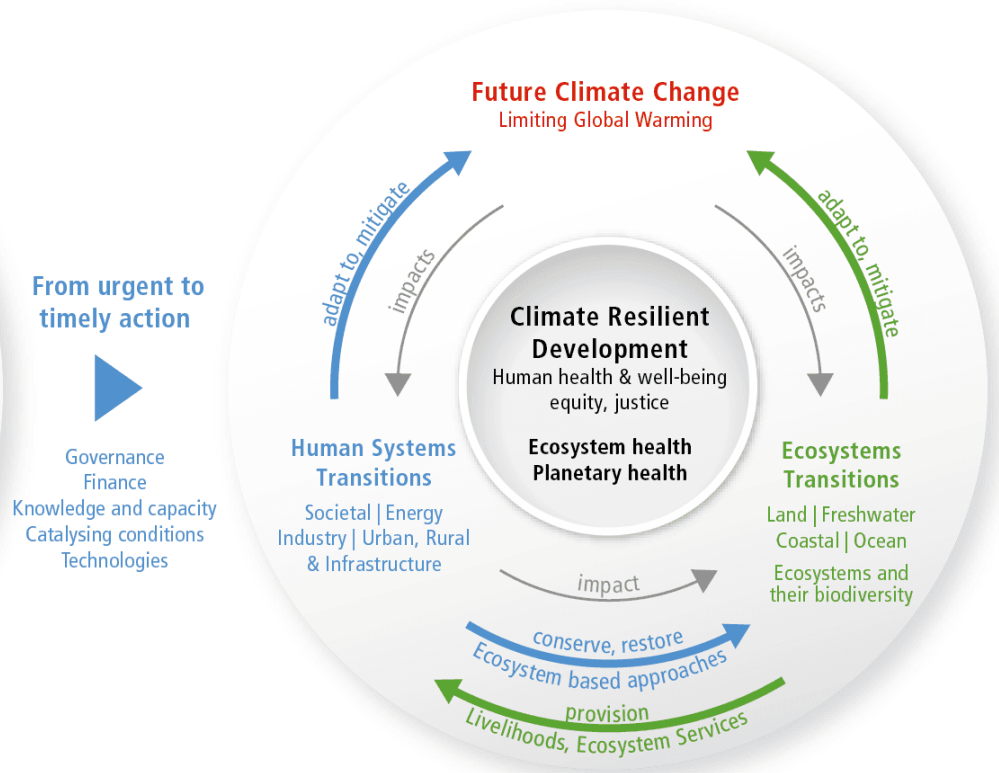
6. 시나리오&모델링 개발 이슈

기후변화 영향 관계 및 기후회복력 증진옵션

(a) Main interactions and trends



(b) Options to reduce climate risks and establish resilience



From urgent to timely action

Governance
Finance
Knowledge and capacity
Catalysing conditions
Technologies

The risk propeller shows that risk emerges from the overlap of:

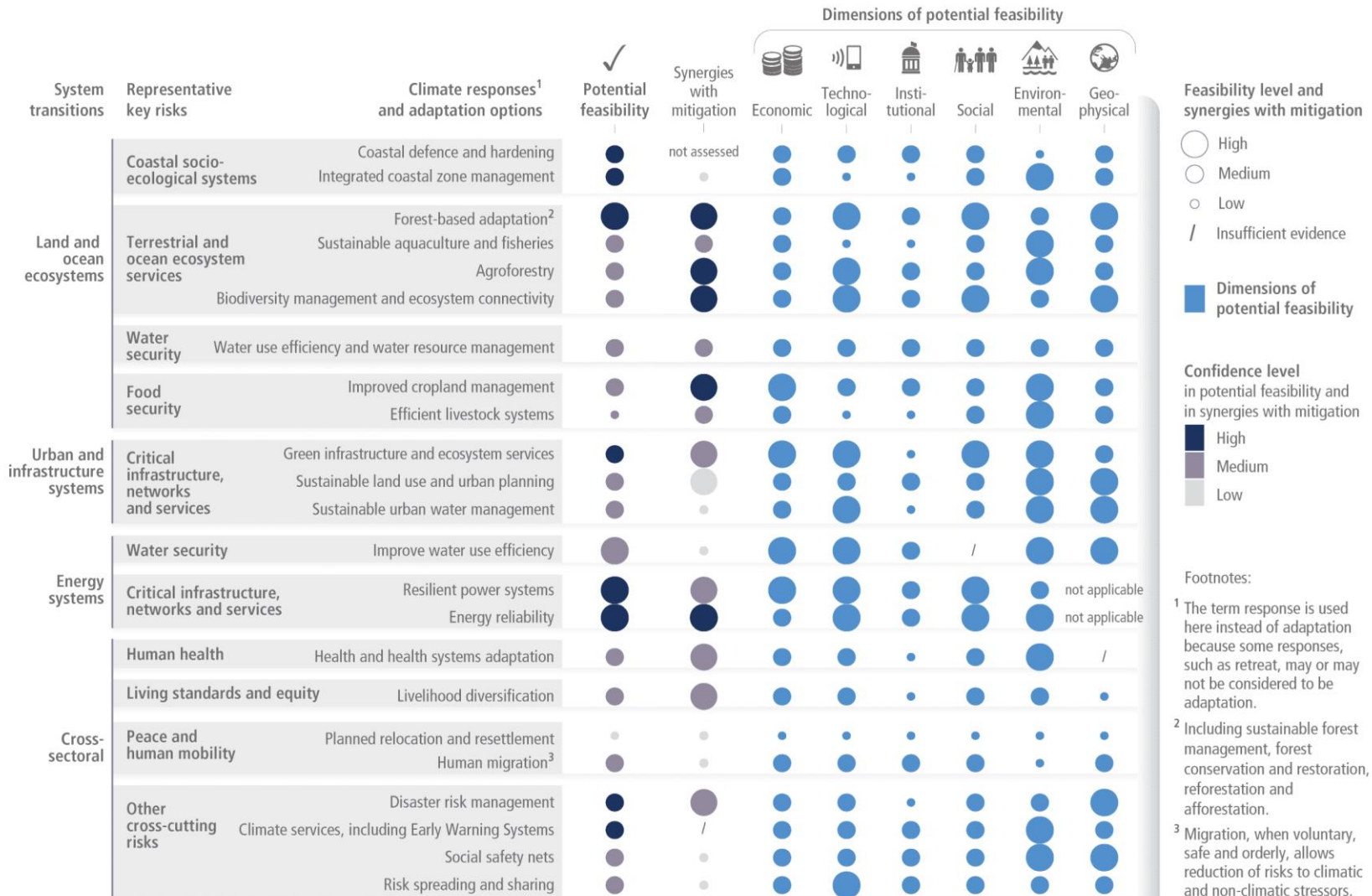
- Climate hazard(s)
 - Vulnerability
 - Exposure
- ...of human systems, ecosystems and their biodiversity

6. 시나리오&모델링 개발 이슈

탄소저감옵션을 고려한 기후적응의 현실성

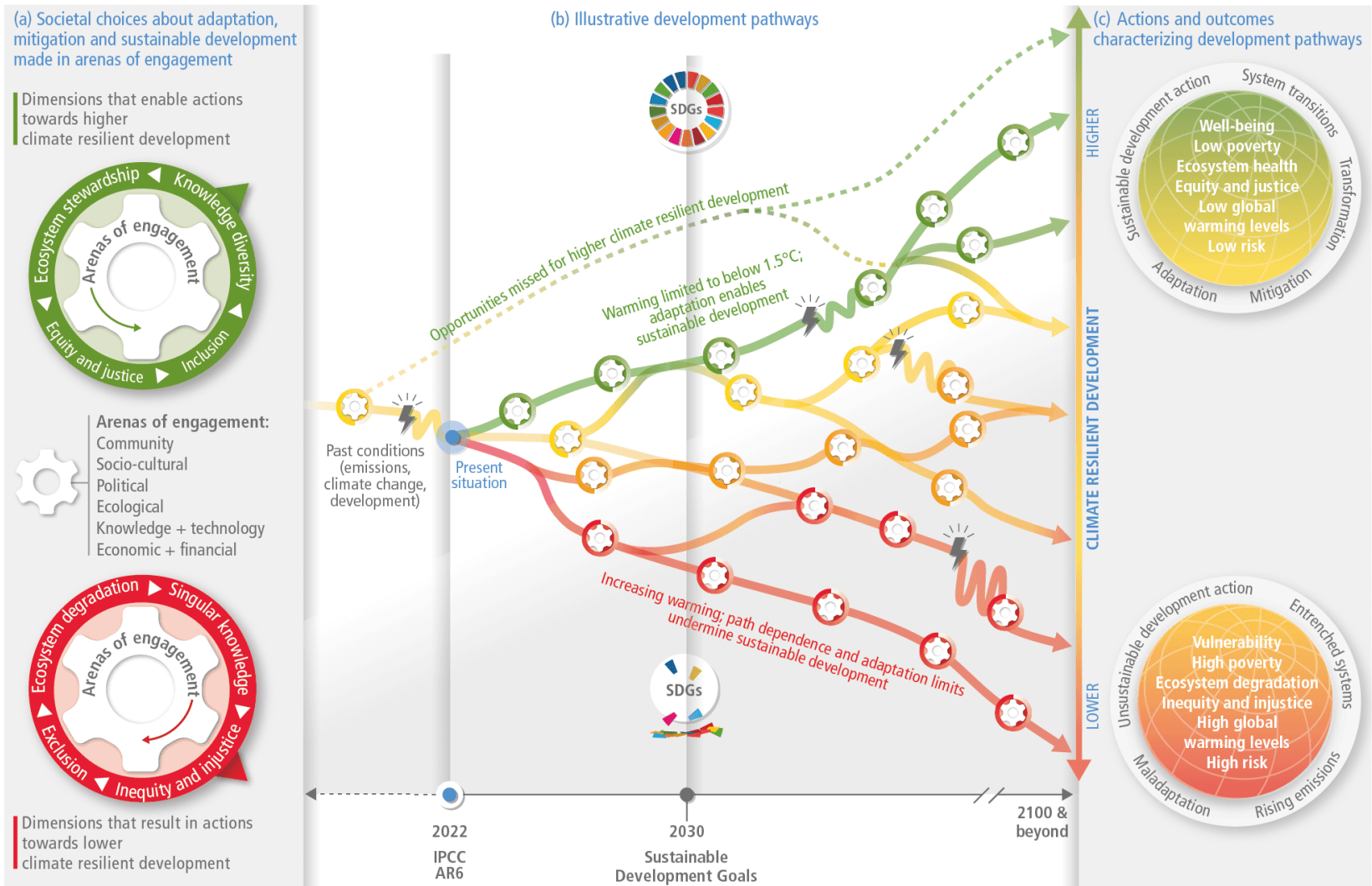
Diverse feasible climate responses and adaptation options exist to respond to Representative Key Risks of climate change, with varying synergies with mitigation

Multidimensional feasibility and synergies with mitigation of climate responses and adaptation options relevant in the near-term, at global scale and up to 1.5°C of global warming



6. 시나리오&모델링 개발 이슈

There is a rapidly narrowing window of opportunity to enable climate resilient development

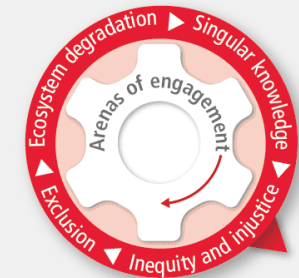


(a) Societal choices about adaptation, mitigation and sustainable development made in arenas of engagement

Dimensions that enable actions towards higher climate resilient development



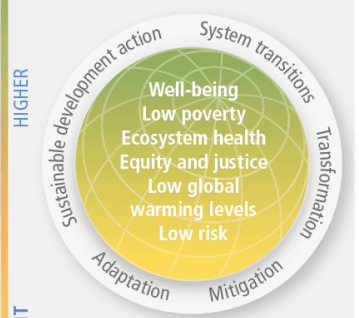
Arenas of engagement:
Community
Socio-cultural
Political
Ecological
Knowledge + technology
Economic + financial



Dimensions that result in actions towards lower climate resilient development

(b) Illustrative development pathways

(c) Actions and outcomes characterizing development pathways



⚡ Illustrative climatic or non-climatic shock, e.g. COVID-19, drought or floods, that disrupts the development pathway

▬ Narrowing window of opportunity for higher CRD