

순환경제를 위한 폐기물 에너지화: 국제사회의 정책 이해

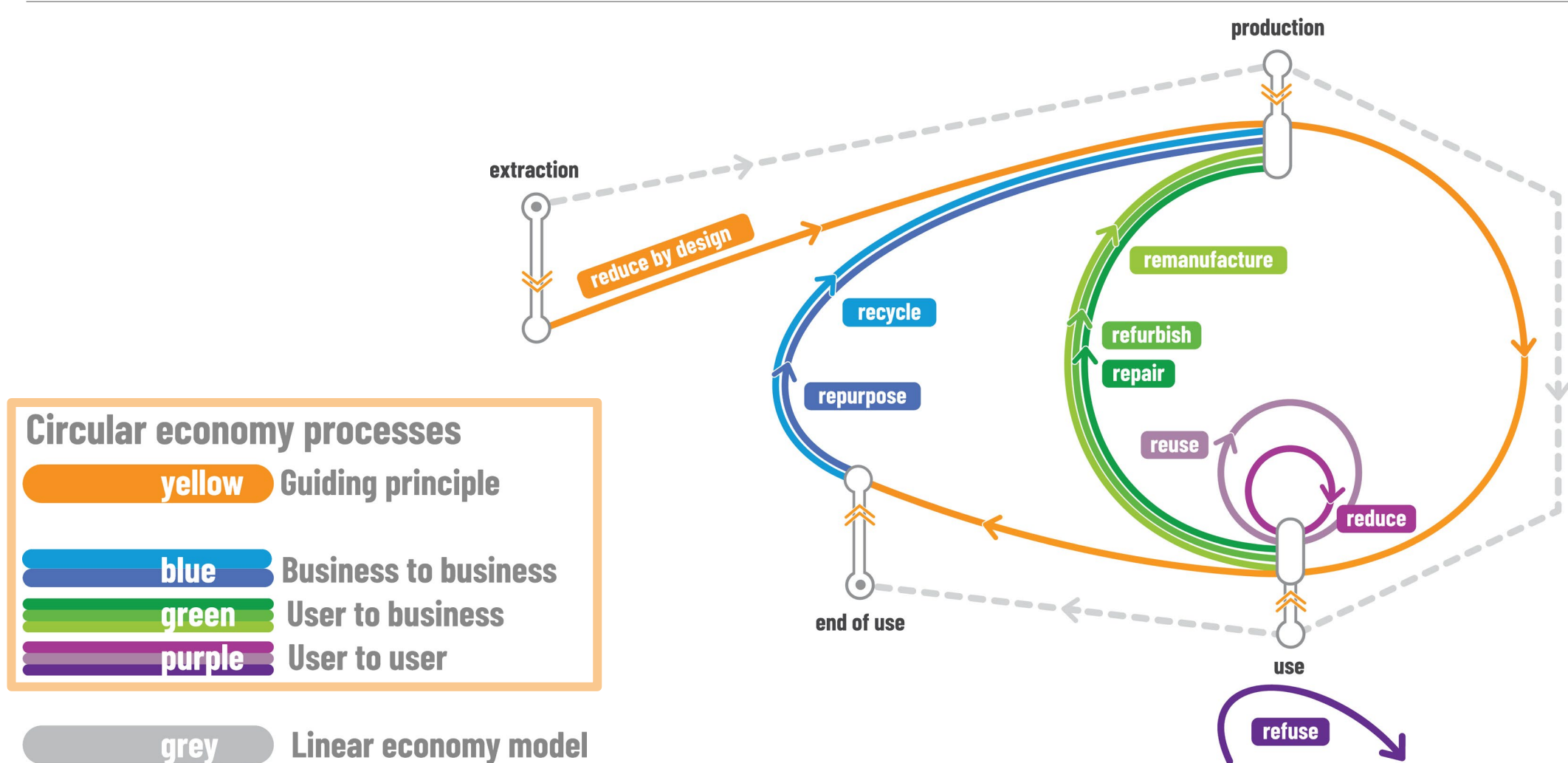
박훈 연구위원



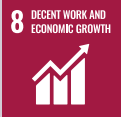
기후변화행동연구소

Institute for Climate Change Action

순환경제(Circular Economy)의 9가지 과정(9-Rs)



순환경제와 UN 지속가능발전목표(SDGs)



세부목표 8.4: 지속가능한 소비와 생산 10개년 계획에 따라, 선진국들이 주도적으로 소비와 생산에 있어 전 세계적으로 자원 효율성을 2030년까지 점진적으로 개선하고, 경제성장을 환경악화로부터 분리시키도록 노력



세부목표 12.2: 2030년까지 천연자원의 효율적인 사용 및 지속가능한 관리 달성






세부목표 12.3: 2030년까지 소매 및 소비자 수준에서 전 세계적으로 1인당 식량낭비를 1/2로 줄이고, 수확 후 손실을 포함하여 식량생산 및 공급과정에서 발생하는 식량 손실 감소

세부목표 12.4: 2020년까지 합의된 국제체계에 따라 화학물질 및 모든 폐기물에 대해 생애주기 동안 친환경적인 관리를 달성하고, 이들이 인체 건강 및 환경에 끼치는 부정적 영향을 최소화하기 위해, 공기, 물, 토양으로의 배출을 크게 감소

세부목표 12.5: 2030년까지 예방, 감축, 재활용 및 재사용을 통하여 폐기물 발생을 상당한 수준으로 감소

세부목표 12.6: 기업들이 특히, 대기업 및 다국적기업이 지속가능한 기업 활동을 채택하고, 지속가능성 정보를 보고주기에 통합하도록 독려

기타 순환경제 관련 UN 지속가능발전목표

	<p>세부목표 2.4: 2030년까지 생산성과 생산량을 증가시키고 생태계 유지에 도움이 되며 기후변화, 기상 이변, 가뭄, 홍수 및 기타 자연재해에 대한 적응력을 강화하고 토지와 토양의 질을 점진적으로 향상 시킬 수 있는 지속가능한 식량생산체계를 보장하며, 회복력 있는 농업 경영 이행</p>
	<p>세부목표 3.9: 2030년까지 유해화학물질, 대기, 수질, 토양의 공해와 오염으로 인한 사망 및 질병 건수를 상당한 수준으로 감소</p>
	<p>세부목표 6.3: 2030년까지 오염 감소, 유해 화학물질 투기 근절 및 배출 최소화를 통해 미처리된 하수 비율을 절반으로 줄이고 재활용 및 안전한 재사용을 전 세계적으로 대폭 확대</p> <p>세부목표 6.4: 2030년까지 모든 부문에서 물 사용 효율을 높이고 물 부족 문제를 해결하고 물 부족으로 고통받는 인구 수를 상당한 수준으로 감소시키기 위해 지속가능한 담수의 취수와 공급을 보장</p>
	<p>Target 7.2: 2030년까지 전세계 에너지원 구성에서 재생에너지 비중을 상당한 수준으로 증대</p> <p>Target 7.3: 2030년까지 전 세계 에너지 효율성 개선율을 2배로 증대</p>
	<p>Target 9.2: 포용적이고 지속가능한 산업화를 촉진하고 2030년까지 국가별 상황에 따라 고용과 국내총생산에서 차지하는 산업의 비율을 상당 수준으로 증대하며, 최빈개도국의 경우 그 비율을 2배로 증대</p> <p>Target 9.4: 2030년까지 모든 국가가 역량에 따라 조치를 취해, 자원효율성이 높고 깨끗하고 환경적으로 안전한 기술과 산업화 과정을 통해 사회기반시설을 개선하고 산업을 개편함으로써 지속가능성을 부여</p>

플라스틱과 관련된 환경문제와 완화 방법

플라스틱의 대표적인 환경 문제

- 핵심 원료로 화석연료에 의존
- 플라스틱 생애주기(원료[채굴·변환] → 제조 → 사용[↔재활용↔] → 폐기 → 분해 등 포함) 동안 온실가스 배출
- 미세플라스틱 등의 환경 유출(plastic leakage)로 해양 등 오염

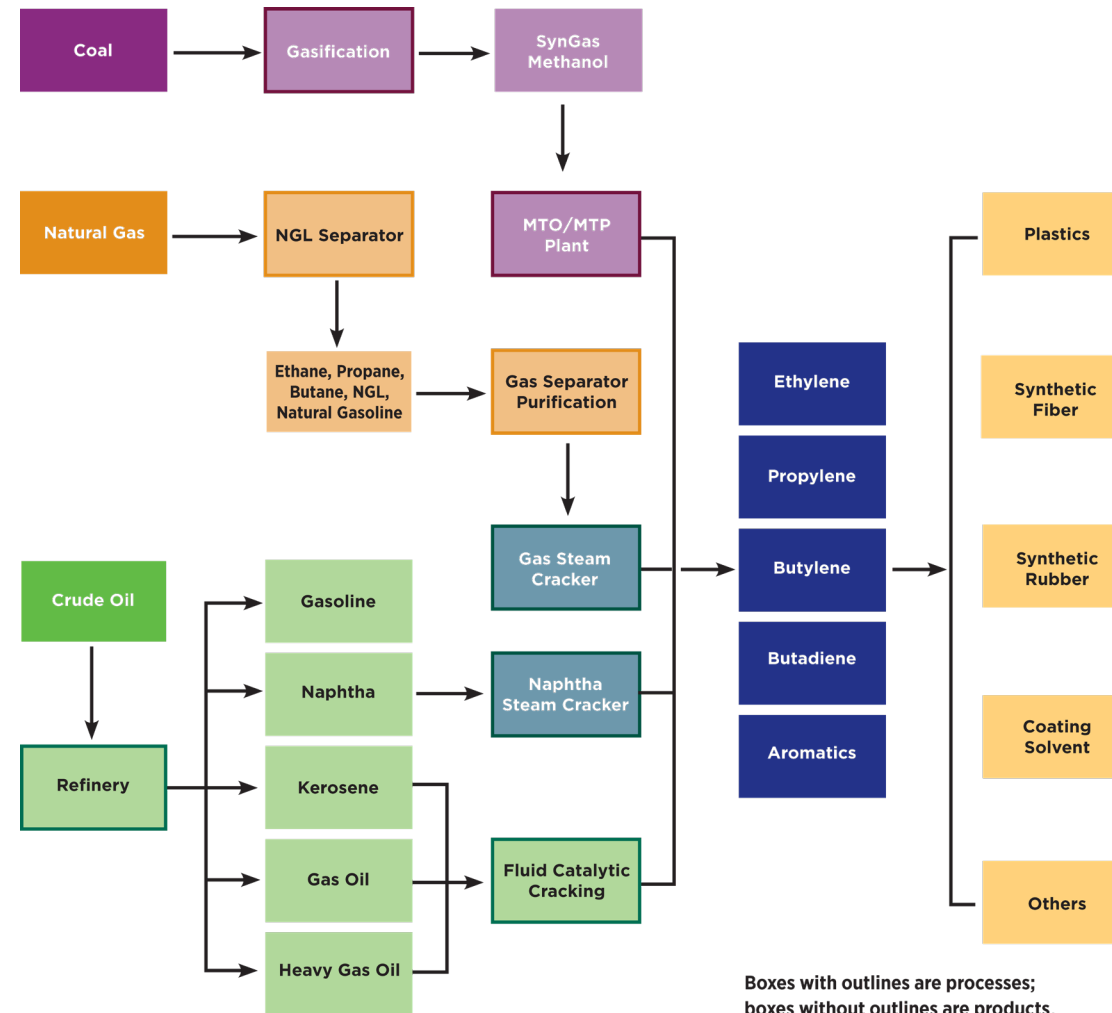
이상적인 해결 방법

- 플라스틱 사용을 회피하거나 줄임
- 더 친환경적인 다른 재료로 대체
- 순환경제 사회로의 전환

현실을 고려한 처리 방법

- 재사용
- 재활용
- 퇴비화 (호기성 환경), 생분해(biodegradation; 혐기성 환경)
- 해중합(depolymerization)
- 열적 처리(thermal treatment): 소각, 가스화, 플라즈마 가스화, 수소 첨가(hydrogenation), 열분해 등
 - 에너지 회수 동반: a.k.a. “waste-to-energy” (“energy-from-waste” or “plastics-to-energy”)
 - 에너지 회수 없는 열적 처리
- 매립: 가장 나쁜 처리 방법

플라스틱(을 비롯한 화학제품)의 핵심 원료인 화석연료



온실가스 배출량: 기존 플라스틱(kg CO₂e/ton polymer)

	Production	Conversion	End-of-life		
			Landfill	Incineration	Recycling
PET	3,332	805	89	1,324	906
HDPE	1,949	1,123			
PVC	2,066	593			
L/LLDPE	1,962	1,088			
PP	1,983	1,366			
PS	3,517	1,240			
PUR	4,900	1,192			
PP&A fibers	3,625	2,700			
Additives	2,200	1,036			
Others	2,837	1,036			

온실가스 배출량: 바이오 소재 플라스틱(kg CO₂e/ton polymer)

Feedstock	Plastic type	Production	Conversion	End-of-life				
				Recycling	Incineration	Landfill	Industrial composting	Anaerobic digestion
Corn	Bio-PE		1314	906	1,324	89	-	-
	Bio-PET	2,280			1,324	89	-	-
	PLA	1,820			1,240	44	1,538	670
	PHA	3,385			1,310	3,400	1,771	790
	TPS	1,279			1,260	1,250	1,410	600
Sugarcane	Bio-PE			906	1,324	89	-	-
	Bio-PET	2,040			1,324	89	-	-
	PLA	566			1,240	44	1,538	670
	PHA	2,034			1,310	3,400	1,771	790
	TPS	1,279			1,260	1,250	1,410	600

2015년 기준 온실가스 배출량(Gt CO₂eq): 플라스틱 vs. 세계·대한민국

	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	F-gases	LUC	GHG without LUC	GHG With LUC	Share in GHG without LUC	
Global life-cycle GHG emissions of conventional plastics						1.70		3.41%	of global GHG emissions
								245.55%	of Korea's GHG emissions
GHG emissions: the world	36.31	9.36	2.72	1.470	6.24	49.86	56.10		
GHG emissions: South Korea	0.59	0.03	0.01	0.02	-0.04	0.69	0.65		

플라스틱 종류별 자연적 분해 소요 시간

플라스틱 종류	흔한 용도	일반적 두께(μm)	추정 표면 열화 속도(최소-최대; μm/year)				추정 반감기(최소-최대; years)			
			육지(매립)	육지 (자외선·열의 열화 가속)	바다	바다 (자외선·열의 열화 가속)	육지(매립)	육지 (자외선·열의 열화 가속)	바다	바다 (자외선·열의 열화 가속)
PET	1회용 물병	500	0	–	–	110	>2500	–	–	2.3
HDPE	물병	500	1.0 (0.91–1.1)	1.3 (0.55–2.6)	4.3 (0–11)	9.5 (4.5–22)	250 (230–280)	190 (95–460)	58 (23 to >250 0)	26 (12–55)
HDPE	파이프	10,000	1.0 (0.91–1.1)	1.3 (0.55–2.6)	4.3 (0–11)	9.5 (4.5–22)	5000 (4600–5500)	3900 (1900–9000)	1200 (450 to >25 00)	530 (230–1100)
PVC	파이프	10,000	0	–	–	–	>2500	–	–	–
LDPE	비닐봉지	100	11	22 (1.6–83)	15 (0–37)	10 (9.0–12)	4.6	2.3 (0.6–32)	3.4 (1.4 to >250 0)	5 (4.2–5.5)
PP	음식물 보관 용기	800	–	0.51	7.5	4.6	–	780	53	87
PS	단열재	20,000	0	–	–	–	>2500	–	–	–
Others	생분해성 비닐봉지 등	100	270 (20–1400)	320	16 (7.5–29)	180	0.19 (0.035–2.5)	0.16	3.1 (1.7–6.7)	0.29

플라스틱 환경 유출(plastic leakage): 해안에서 가장 많이 발견되는 플라스틱 제품(미국 사례)

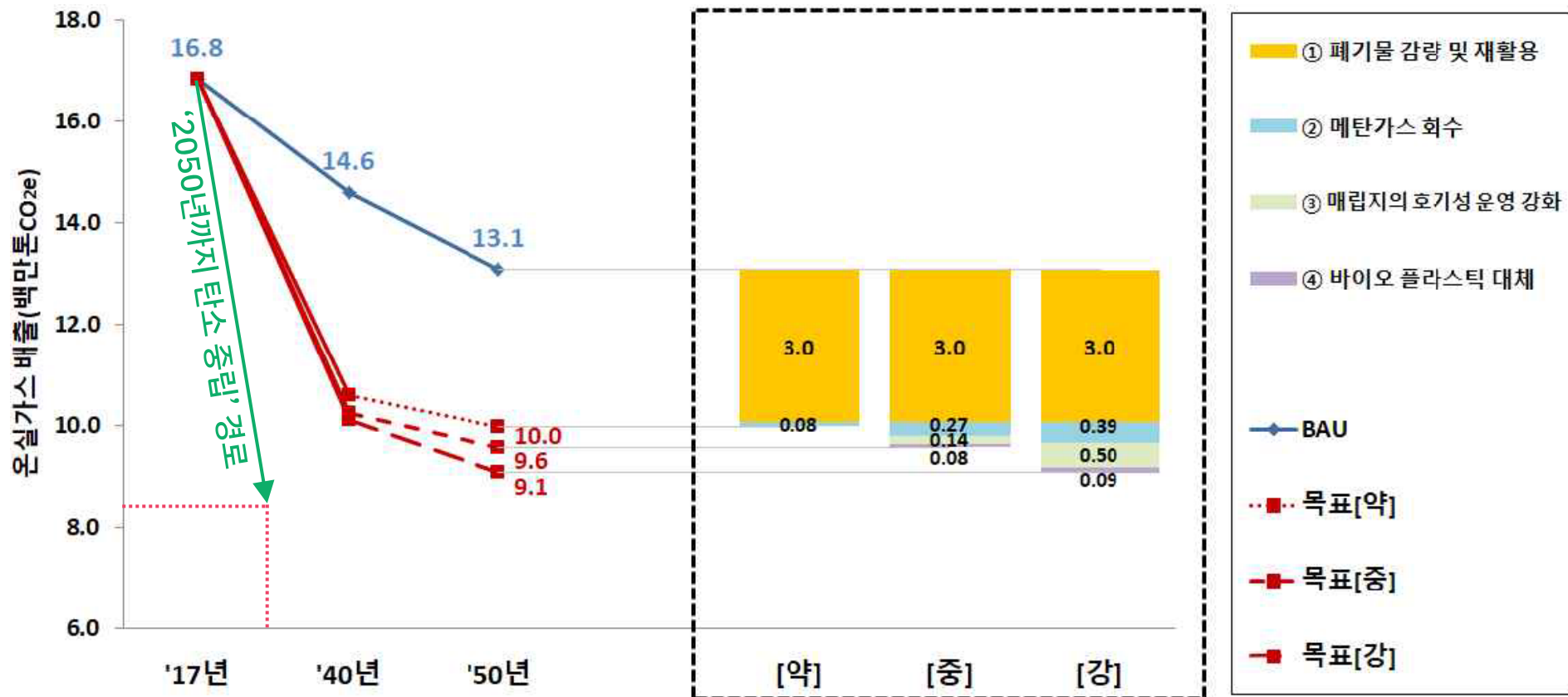
Plastic Product	ICC	NOAA	MOT	Heal the Bay	COA	Project aware	Total	Percent
Food Wrappers (candy, chips, etc.)	318,880.0	272.0	16,315.0	307.0	14,827.0	217.0	350,818.0	18.6
Bottle Caps (Plastic)	273,089.0	779.0	11,735.0	27,352.0	2,328.0	205.1	315,488.1	16.7
Beverage Bottles (Plastic)	206,993.0	122.0	7,809.0	6,297.0	5,508.0	289.0	227,018.0	12.0
Bags (Plastic)	157,702.0	39.0	6,970.0	5,249.0	7,871.0	313.0	178,144.0	9.4
Straws, Stirrers	125,635.0	172.0	4,645.0	4,026.0	8,102.0	165.0	142,745.0	7.5
Lids (Plastic)	75,921.0	186.9	409.0	5,829.5	15,347.0	57.9	97,751.2	5.1
Utensils	42,599.0	33.0	1,848.0	47,133.0	1,864.0	352.0	93,829.0	4.9
Cigarette Butts	51,550.5	25.3	2,337.9	6,775.9	643.0	9.1	61,341.7	3.2
Take Out/Away Containers (Foam)	41,805.0	102.9	537.7	17,696.0	548.0	8.3	60,697.8	3.2
Take Out/Away Containers (Plastic)	49,973.0	123.0	37.0	5,624.0	1,021.7	9.9	56,788.6	3.0
Cups, Plates (Plastic)	48,559.0	14.6	732.6	1,862.2	1,766.0	9.6	52,943.9	2.8
Cigar Tips	41,211.0	47.0	328.0	6,243.0	2,351.0	16.0	50,196.0	2.6
Cups, Plates (Foam)	42,047.0	12.4	4,495.7	690.0	2,021.0	8.3	49,274.5	2.6
Tobacco Packaging/Wrap	33,434.0	82.3	604.5	352.0	694.0	19.0	35,185.8	1.8
Balloons	23,492.0	19.0	1,442.0	5,263.0	480.3	13.0	30,709.3	1.6
Other Plastic Bottles	17,548.0	62.0	1,578.0	4,769.6	1,429.0	9.0	25,395.6	1.3
Cigarette Lighters	10,750.0	24.0	676.5	10,750.0	405.0	3.0	22,608.5	1.2
Personal Care Products (Condoms & Tampon Applicators)	11,555.0	37.4	827.5	2,213.2	1,875.1	14.0	16,522.2	0.8
6-Pack Holders	8,224.0	3.0	180.0	641.0	130.0	10.0	9,188.0	0.4
Diapers	3,938.0	12.5	276.8	2,150.6	82.0	7.0	6,466.9	0.3
Total	1,584,905.5	2,169.3	63,785.2	161,223.9	69,293.0	1,735.1	1,883,112.0	100

이상적인 해결 방법(순환경제 사회로의 전환): 체제 변혁으로 2040년까지 플라스틱 오염을 80% 감축



폐기물 에너지화 관련 국제사회 정책: '파리협정'을 따르는 우리나라의 폐기물 부문 온실가스 배출 경로

‘2050년까지 탄소 중립’ 달성을 위해서는 2030년까지 50%(8.4 백만톤CO₂e) 감축으로 목표 강화 필요(IPCC, 2018)



폐기물 에너지화 관련 국제사회 정책

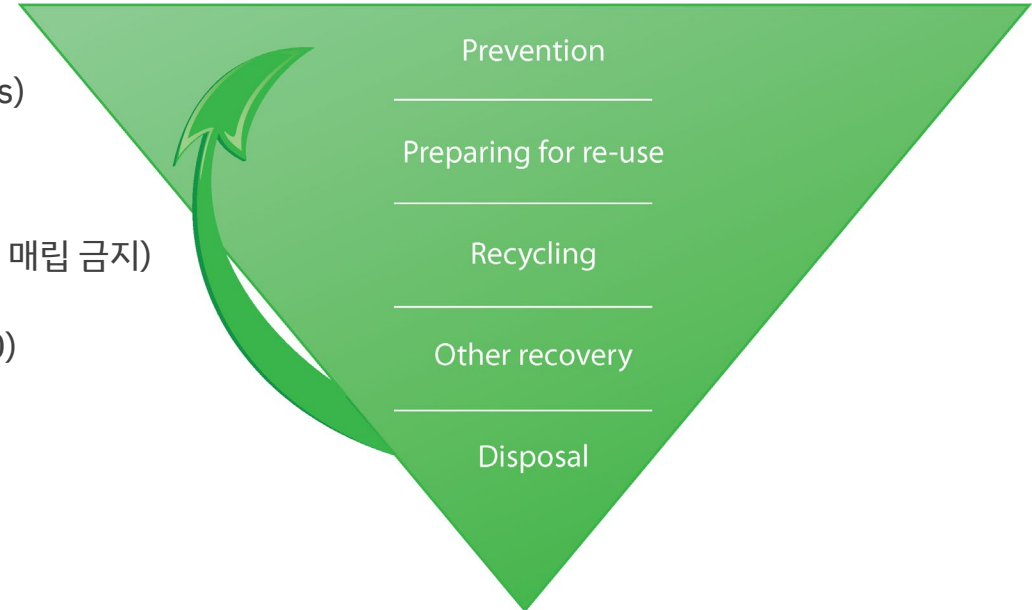
다자조약

- 유해폐기물의 국가간 이동 및 그 처리의 통제에 관한 바젤협약(Basel Convention on the Control of Transboundary Movements of Hazardous Wastes and their Disposal)
 - 2019년 5월 개정: 플라스틱도 유해폐기물과 같이 사전동의절차(Prior informed consent (PIC) procedure)를 거
- 폐기물 및 그밖의 물질의 투기에 의한 해양오염방지에 관한 협약(London Convention on the Prevention of Marine Pollution by Dumping of Wastes and Other Matter)
 - 미세플라스틱의 해양 오염 규제

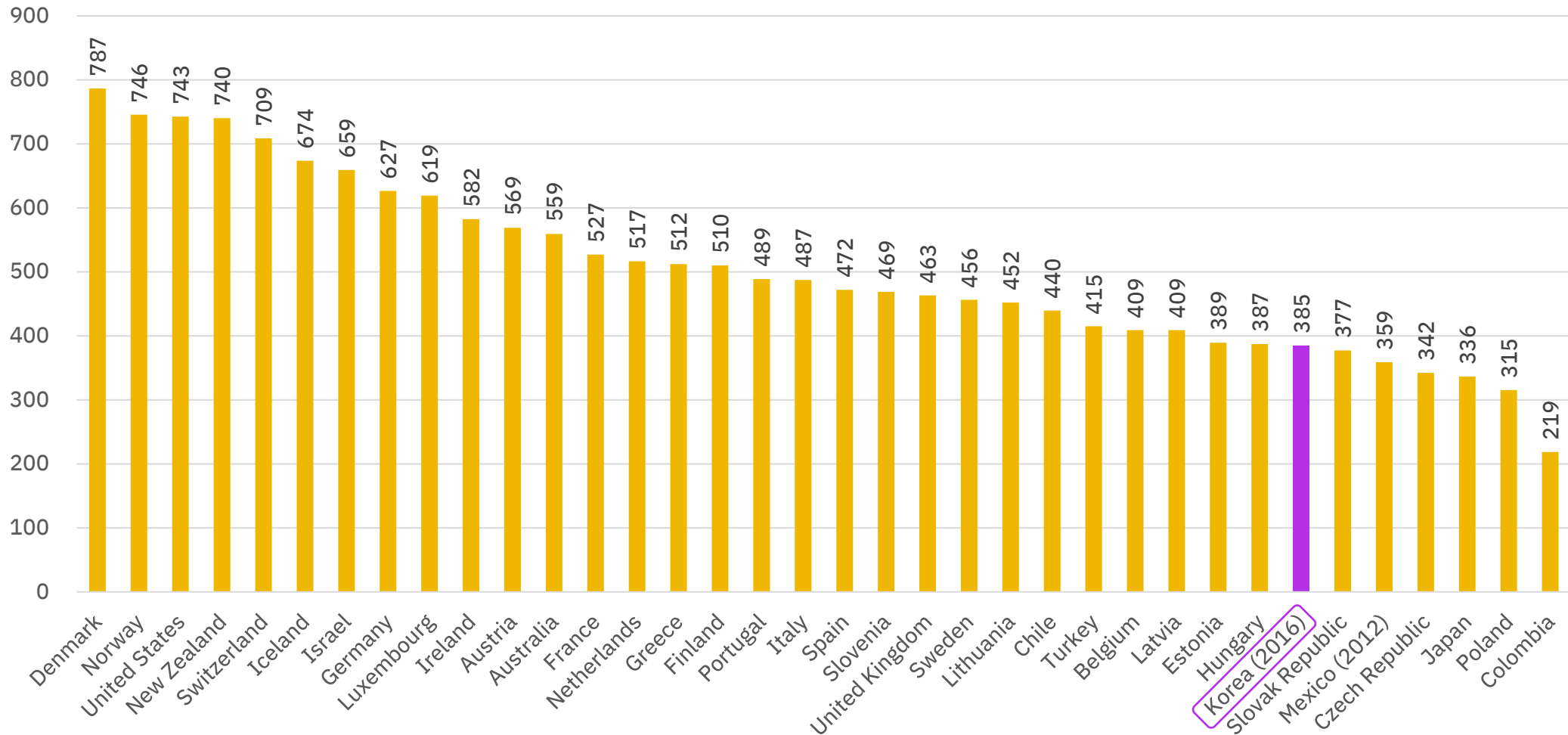
주요 무역 상대국의 환경 정책

- 유럽연합
 - REACH (Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals)
 - 1회용 플라스틱 사용 제한, 미세플라스틱 규제 추진
 - Waste Framework Directive (2008/98/EC): “waste hierarchy”
 - “The role of waste-to-energy in the circular economy”
(에너지 회수는 재활용할 수 없는 폐기물에만 적용; 재활용·복원할 수 있는 폐기물은 매립 금지)
 - Industrial emissions directive (2010/75/EU)
 - “Best Available Techniques (BAT)” for waste incineration (EU 2019/2010)
- 미국
 - Resource Conservation and Recovery Act
 - Toxic Substances Control Act

Moving up the waste hierarchy



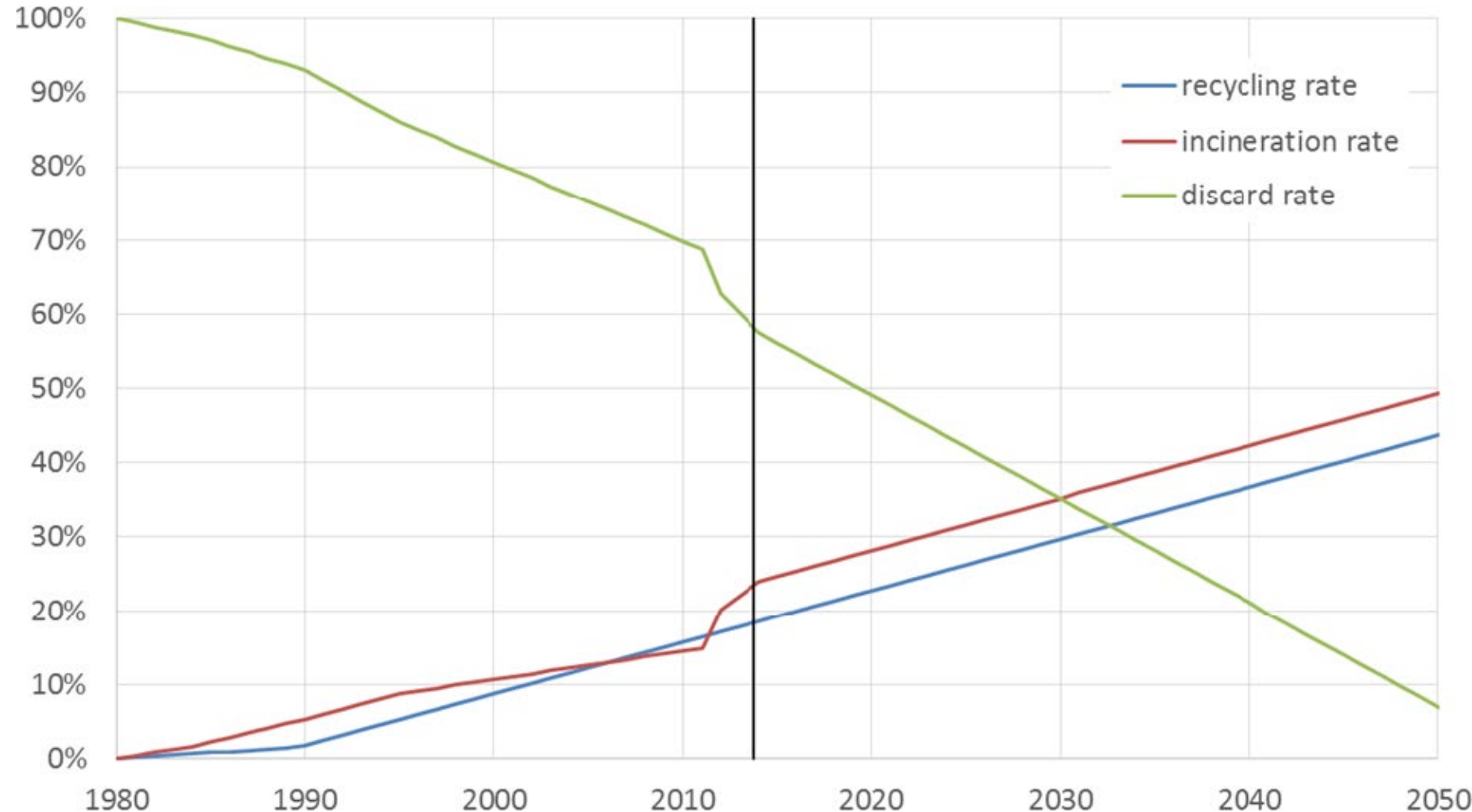
OECD 회원국의 도시고형폐기물(MSW) 배출량(kg/인; 2017년 기준)



플라스틱 폐기물 처리에서 소각 비중 증가 전망

플라스틱 폐기물 처리 방법 전망:
재활용, 소각, 매립

- 1980~2014: 검정선 왼쪽
- 2015~2050: 검정선 오른쪽

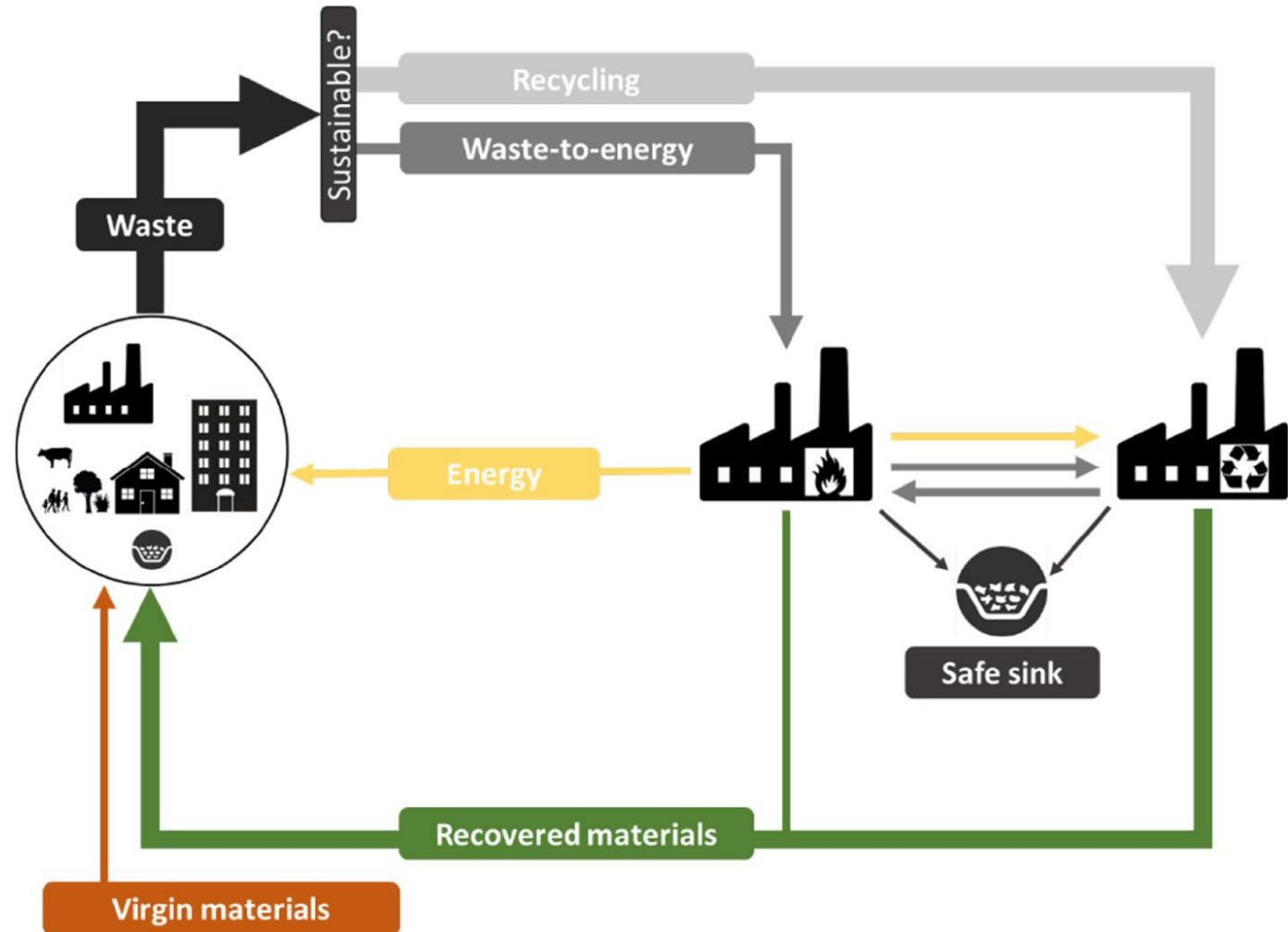


폐기물 에너지화의 순환경제 속성

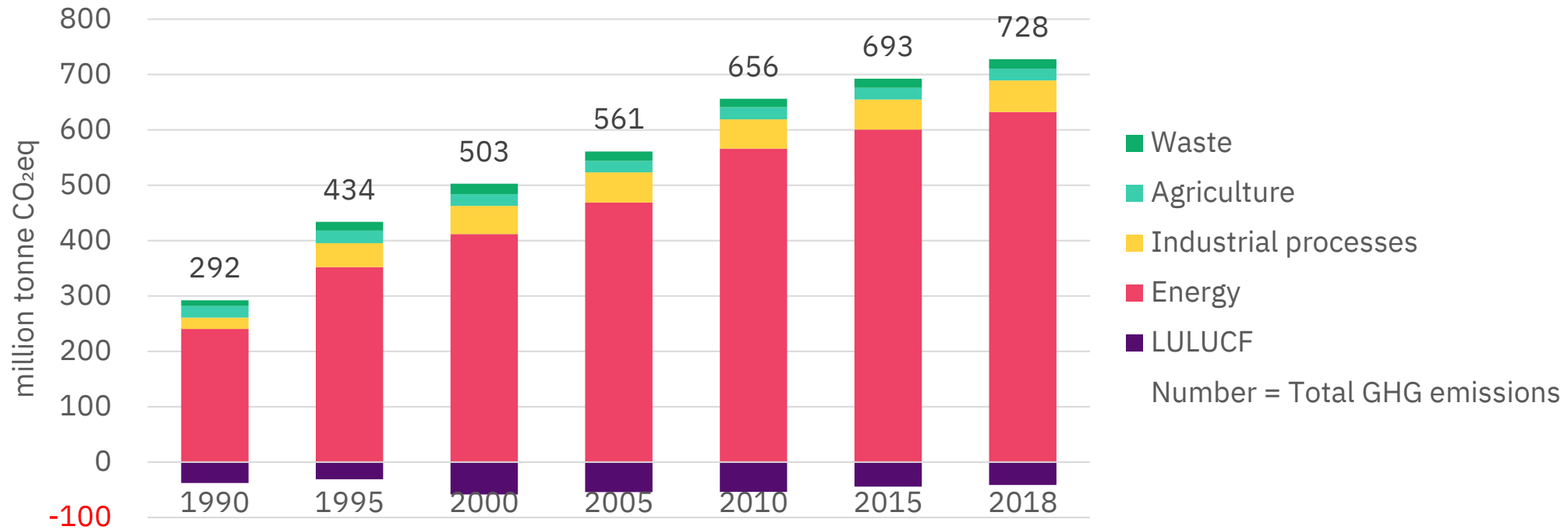
재활용할 수 없는 폐기물만
에너지화하면 매립(더 낮은
단계의 처리방법)보다 환경에
도움이 된다.

(제대로 처리하면) 물질 순환에서
독성 물질을 제거할 수 있다.

그냥 두면 순환할 수 없는 재료를
에너지 공급을 통해 순환경제에
포함할 수 있다.

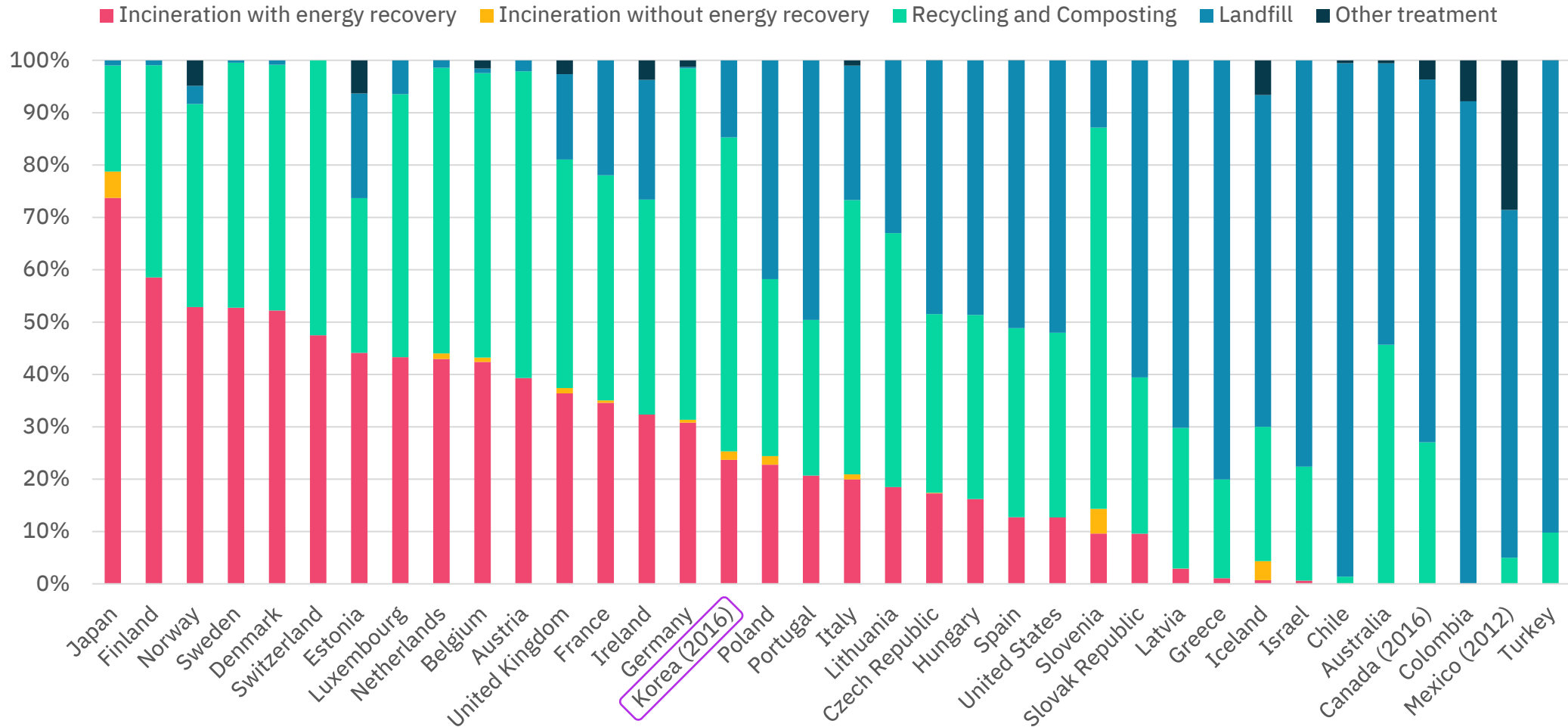


우리나라의 온실가스 배출량 추이: 전체 vs. 폐기물 부문 배출량

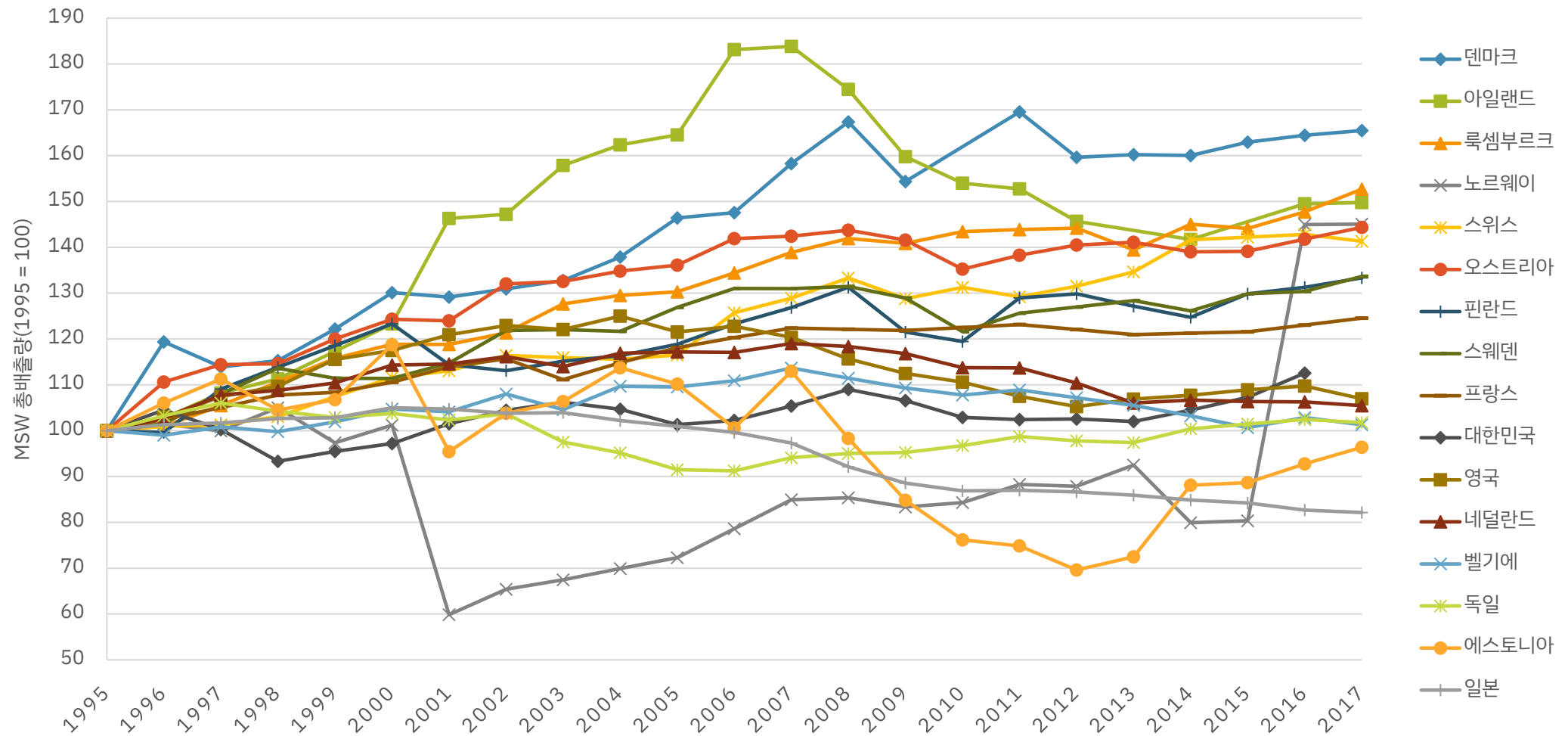


Waste sector GHG emissions	1990	1995	2000	2005	2010	2015	2018
Waste landfill	7.492	9.796	9.543	8.876	7.755	7.727	7.834
Waste incineration	1.430	4.173	7.636	6.001	5.643	6.874	7.098
Other waste treatment	1.454	1.786	1.653	1.873	1.783	1.951	2.161

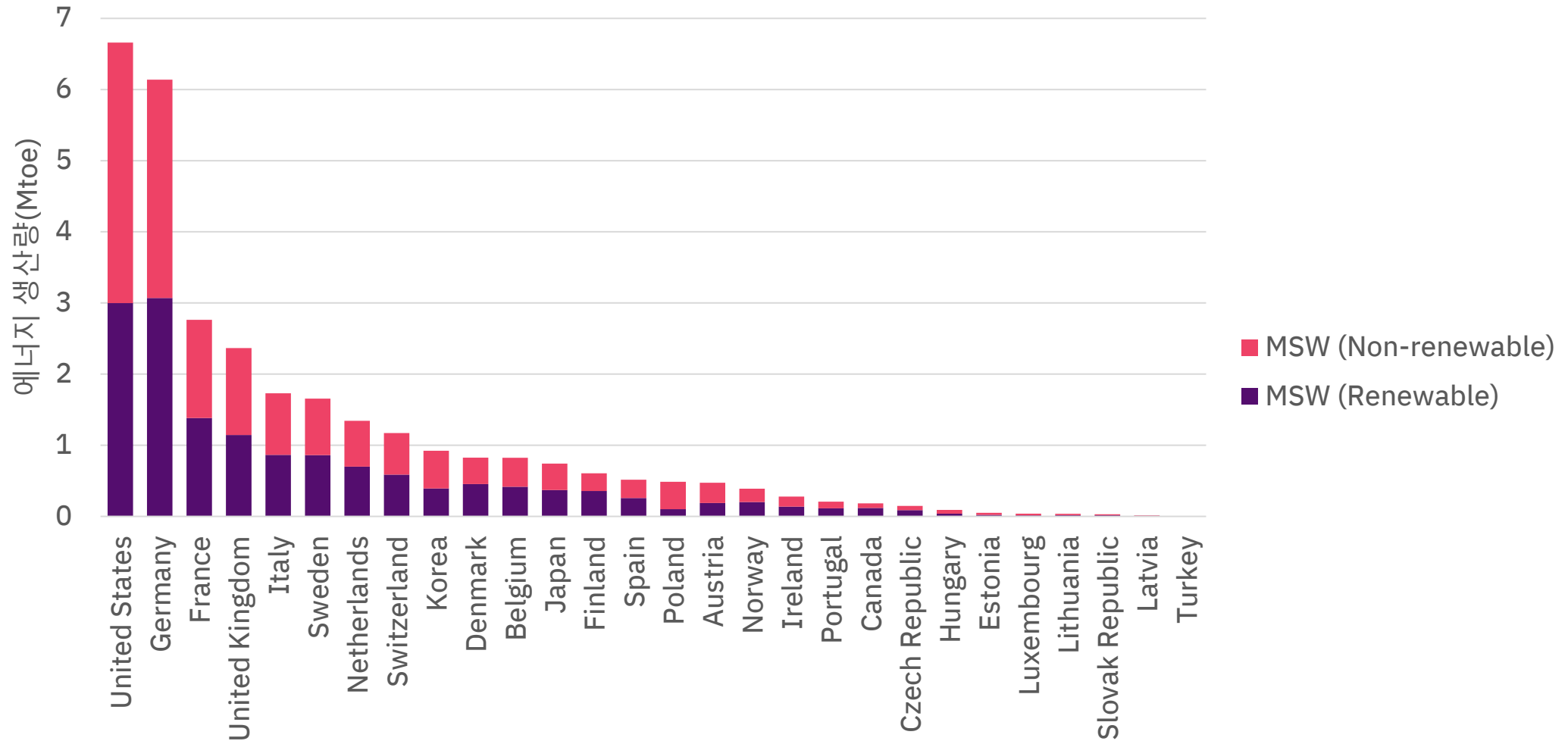
OECD 회원국의 도시고형폐기물(MSW) 처리 방법(2017년 기준)



OECD 에너지 회수율 상위 회원국의 전체 MSW 발생량 추이



OECD 회원국의 MSW 에너지 생산(2019년)

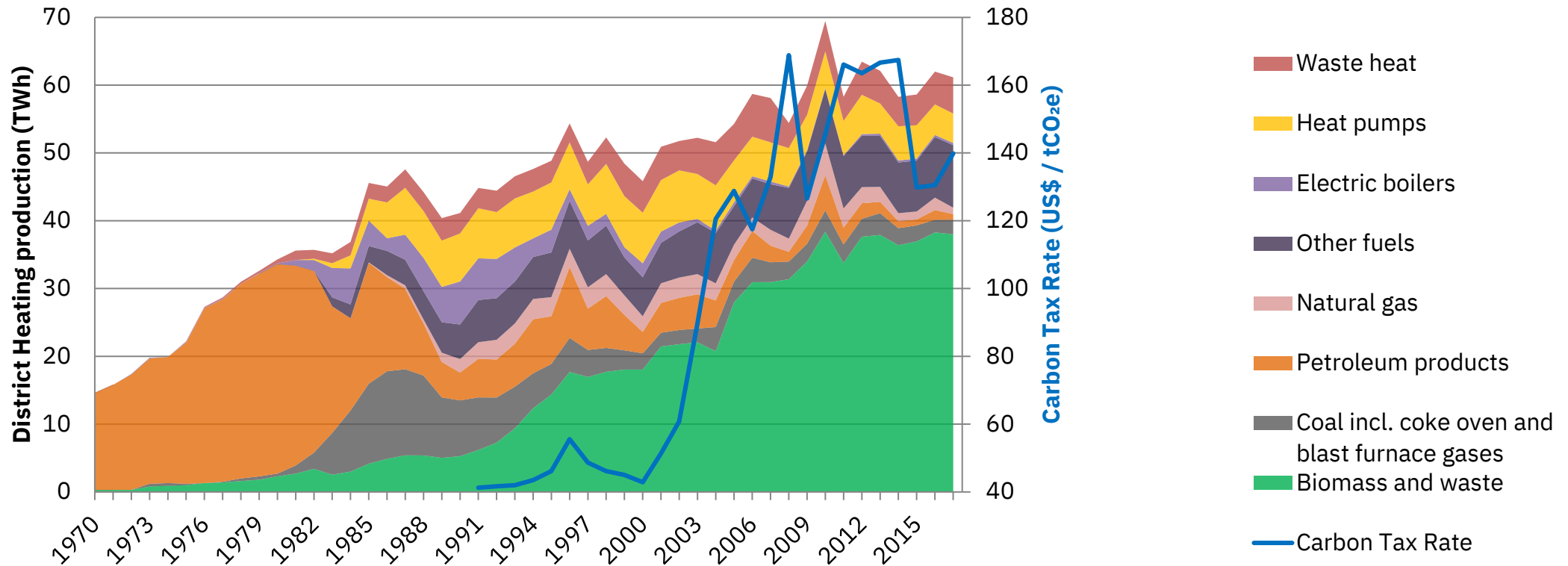


[MSW 에너지] / 총일차에너지공급

	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
Denmark	5.101%	4.926%	4.823%	5.174%	5.108%	4.914%	5.050%	4.709%	4.998%
Switzerland	4.262%	4.328%	3.995%	4.323%	4.563%	4.862%	4.856%	4.886%	4.813%
Sweden	2.198%	2.329%	2.508%	2.654%	3.076%	2.993%	3.053%	2.798%	3.518%
Ireland	0.189%	0.684%	0.843%	0.922%	0.947%	0.938%	1.522%	2.082%	2.065%
Germany	1.539%	1.650%	1.821%	1.977%	1.939%	2.001%	2.068%	2.054%	2.040%
Netherlands	2.108%	1.979%	1.926%	2.069%	1.994%	1.997%	1.942%	1.968%	1.887%
Finland	0.685%	0.917%	1.138%	1.263%	1.455%	1.566%	1.700%	1.747%	1.787%
Norway	0.941%	1.019%	1.014%	1.179%	1.242%	1.269%	1.252%	1.390%	1.629%
Belgium	1.626%	1.303%	1.234%	1.373%	1.390%	1.309%	1.335%	1.370%	1.490%
Austria	1.121%	1.131%	1.126%	1.348%	1.411%	1.530%	1.317%	1.414%	1.428%
United Kingdom	0.451%	0.497%	0.491%	0.648%	0.794%	0.979%	1.066%	1.245%	1.380%
Italy	1.004%	1.000%	1.065%	1.170%	1.109%	1.153%	1.112%	1.125%	1.172%
France	0.907%	0.960%	0.915%	0.986%	0.973%	1.045%	1.038%	1.077%	1.145%
Estonia			1.726%	1.175%	1.231%	1.173%	1.268%	0.807%	0.963%
Portugal	0.862%	0.802%	0.900%	0.772%	0.887%	0.951%	0.916%	0.881%	0.953%
Luxembourg	0.700%	0.701%	0.737%	0.731%	0.874%	0.906%	0.988%	0.950%	0.946%
OECD Total	0.499%	0.510%	0.521%	0.541%	0.553%	0.568%	0.570%	0.569%	0.577%
Poland	0.161%	0.139%	0.135%	0.155%	0.166%	0.356%	0.416%	0.438%	0.470%
Lithuania			0.323%	0.332%	0.453%	0.827%	0.784%	0.531%	0.467%
Spain	0.311%	0.281%	0.342%	0.358%	0.426%	0.394%	0.413%	0.407%	0.423%
Latvia	0.039%	0.028%	0.047%	0.094%	0.143%	0.144%	0.197%	0.288%	0.349%
Czech Republic	0.306%	0.323%	0.320%	0.328%	0.317%	0.343%	0.354%	0.337%	0.344%
Hungary	0.321%	0.364%	0.347%	0.372%	0.448%	0.418%	0.323%	0.305%	0.338%
Korea	0.360%	0.340%	0.329%	0.329%	0.357%	0.334%	0.337%	0.340%	0.329%
United States	0.326%	0.332%	0.324%	0.319%	0.321%	0.335%	0.324%	0.318%	0.302%
Slovak Republic	0.195%	0.202%	0.155%	0.258%	0.243%	0.222%	0.304%	0.160%	0.178%
Japan	0.265%	0.270%	0.277%	0.282%	0.287%	0.174%	0.159%	0.173%	0.177%
Canada	0.047%	0.052%	0.064%	0.065%	0.065%	0.064%	0.062%	0.061%	0.061%
Turkey								0.003%	0.003%

스웨덴의 지역난방(district heating; DH) 관련 정책과 열원 변화

- 1991년: 탄소세 시행(일반용과 산업용 세율이 달랐으나, 2018년부터 동일세율[2019년 기준 약 127 US\$])
- 2000년: 매립세 시행(2020년 기준 세율: 540 SEK[≈ 7만 원]/톤)
- 2001년: 유기성 및 가연 비독성 생활폐기물 매립 금지
- 2016년 기준, DH 열원 중 MSW가 24% 차지(IEA, 2019); 덴마크, 핀란드도 스웨덴과 비슷한 정책 시행.



요약

- 순환경제(circular economy)는 미래세대와 지구촌의 생존을 위해 중요한 지속가능발전 사회로의 전환 방향을 제공한다.
- 생활폐기물 중 에너지 생산에 가장 중요하게 쓰이는 플라스틱은 여러 가지 기후·환경 문제를 일으키는데 이상적인 해결 방법을 적용할 수 없는 많은 상황에서 가장 순환경제에 도움 되는 처리방법의 하나로 에너지화에 기대를 걸 수 있다.
- 도시고형폐기물(MSW), 특히 플라스틱 폐기물의 에너지화와 관련하여 국제사회의 정책 개발이 속도를 내고 있다.
- 폐기물 에너지화에서 앞서가는 국가들의 특징을 살펴보고, 모범적인 국가의 정책을 살펴보았다.
- 우리나라의 폐기물에너지화 현황을 (단순 수치가 아닌) 현장 분석으로 제대로 파악하면 순환경제 성취에 이바지할 수 있는 정책에 대한 구체적인 아이디어를 얻을 수 있으리라 기대한다.

감사합니다.