탄소중립연구원
Carbon Neutral Research Institute

GREET 프로그램 교육 세미나

Session – GREET 기본 계산 구조 설명

2021. 07. 06.
발표자 - 이민

전과정 평가

- **전과정 평가(LCA, Life Cycle Analysis)**

  다양한 연료 및 자동차 기술에 대한 객관적 평가 필요

에너지 생산 및 이용의 모든 과정

각 과정의 정량화

환경에 미치는 영향 평가

Life Cycle Analysis (Well-to-Wheel 분석)

1. Well-to-Pump(Tank)
2. Pump(Tank)-to-Wheel

Well-to-Wheel Analysis

출처: Michael Wang, GREET Model, Argonne National Laboratory, 2009

LCA 모델 (GREET)

탄소중립연구원
Carbon Neutral Research Institute

- **GREET (미국 아르곤 연구소 개발) 프로그램 사용**

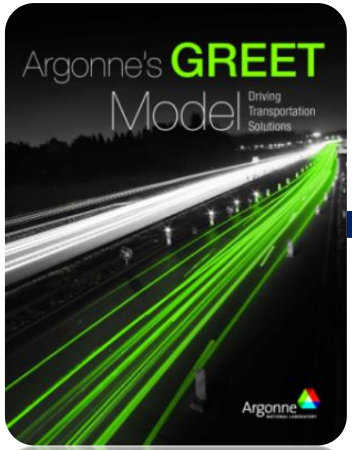
GREET (미국 Argonne National Lab), GHGenius (캐나다 (S&T)[2] Consultants Inc.),
E3 Database (유럽 LBST Inc.,JEC) 등의 프로그램 중 **GREET**을 사용

- GREET은 Excel 스프레드시트 기반 모델
- 프로그램 내의 값 및 구조를 변경해 국내 특화 자동차 연료 LCA 분석 모델 및 데이터베이스 마련

2. Well-to-Wheels Energy Consumption and Emissions: per Mile

Gasoline Vehicle: CG and RFG

	Btu/mile or grams/mile				Per
Item	Feedstock	Fuel	Vehicle Operation	Total	Feedsto
Total Energy	272	762	4,908	5,943	4.6
Fossil Fuels	264	668	4,806	5,738	4.6
Coal	35	52	0	87	40.2
Natural Gas	160	279	0	439	36.4
Petroleum	69	337	4,806	5,212	1.3
CO2 (w/ C in VOC & CO)	18	60	377	454	3.9
CH4	0.457	0.078	0.015	0.550	83.2
N2O	0.000	0.005	0.012	0.017	2.6
GHGs	29	63	381	473	6.2

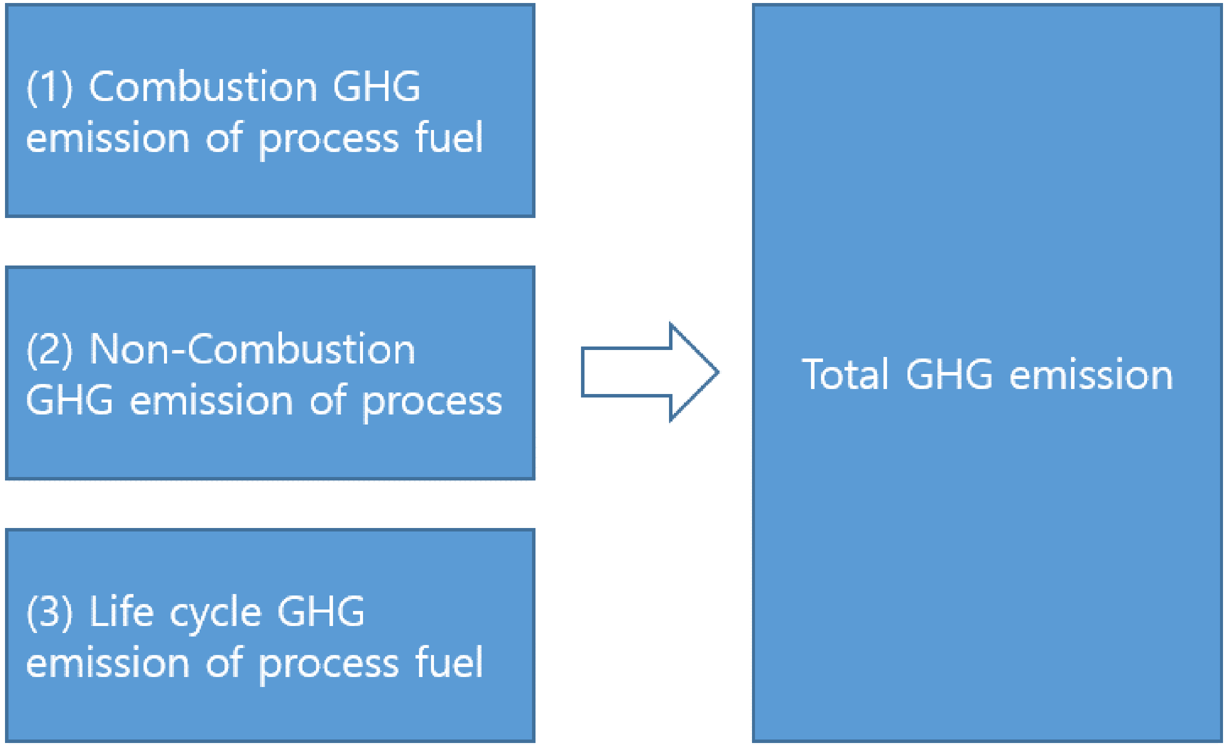


→

Korea GREET

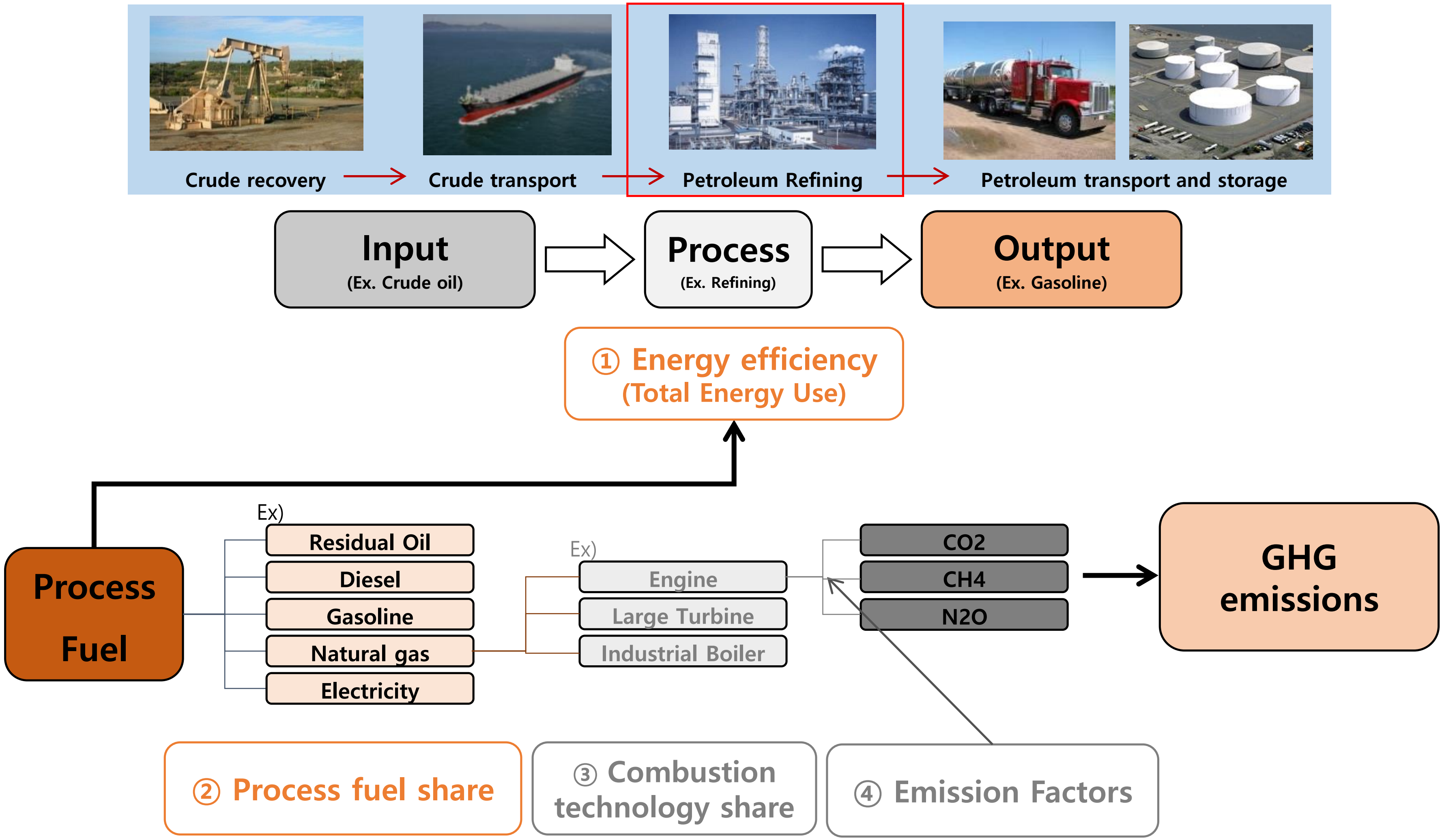
최종 온실가스 배출량

- 연소로 인한 배출량 + 비연소로 인한 배출량 + 공정 연료 전과정 배출량



연소 배출량 기본 계산 구조

- 각 과정의 Energy use 및 GHG emission 값 계산 구조



① Energy efficiency & Process fuel share

- **GREET 프로그램(Excel로 작성)에서 각 과정의 기본 구조**

	Refining
Energy efficiency	95.60%
Loss factor	1.000
Shares of process fuels	
Crude oil	0.0%
Residual oil	10.0%
Diesel fuel	27.3%
Gasoline	0.0%
Natural gas	48.6%
Coal	0.0%
Liquefied petroleum gas	0.0%
Electricity	12.6%
Hydrogen	0.0%
Pet coke	1.5%

GREET에서 각 과정의 기본 구조

$$\textbf{Energy efficiency} = \frac{\text{Energy of Product}}{\text{Energy of Product} + \text{Energy of Process fuel}}$$

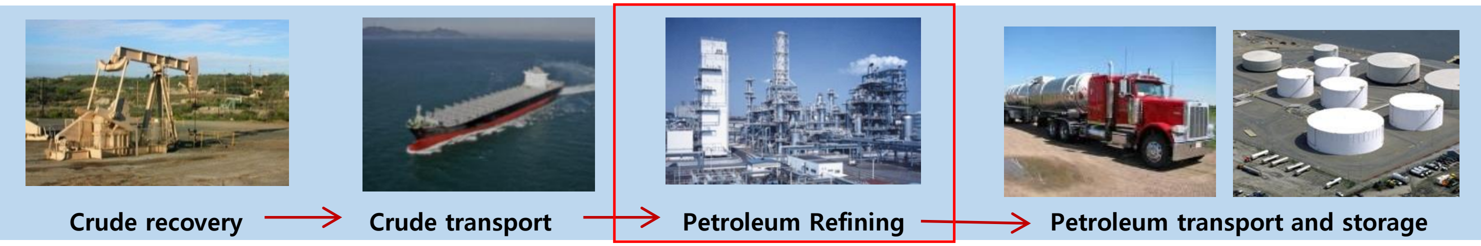
$$\textbf{(1/Energy efficiency) -1} = \frac{\text{Energy of Process fuel}}{\text{Energy of Product}}$$

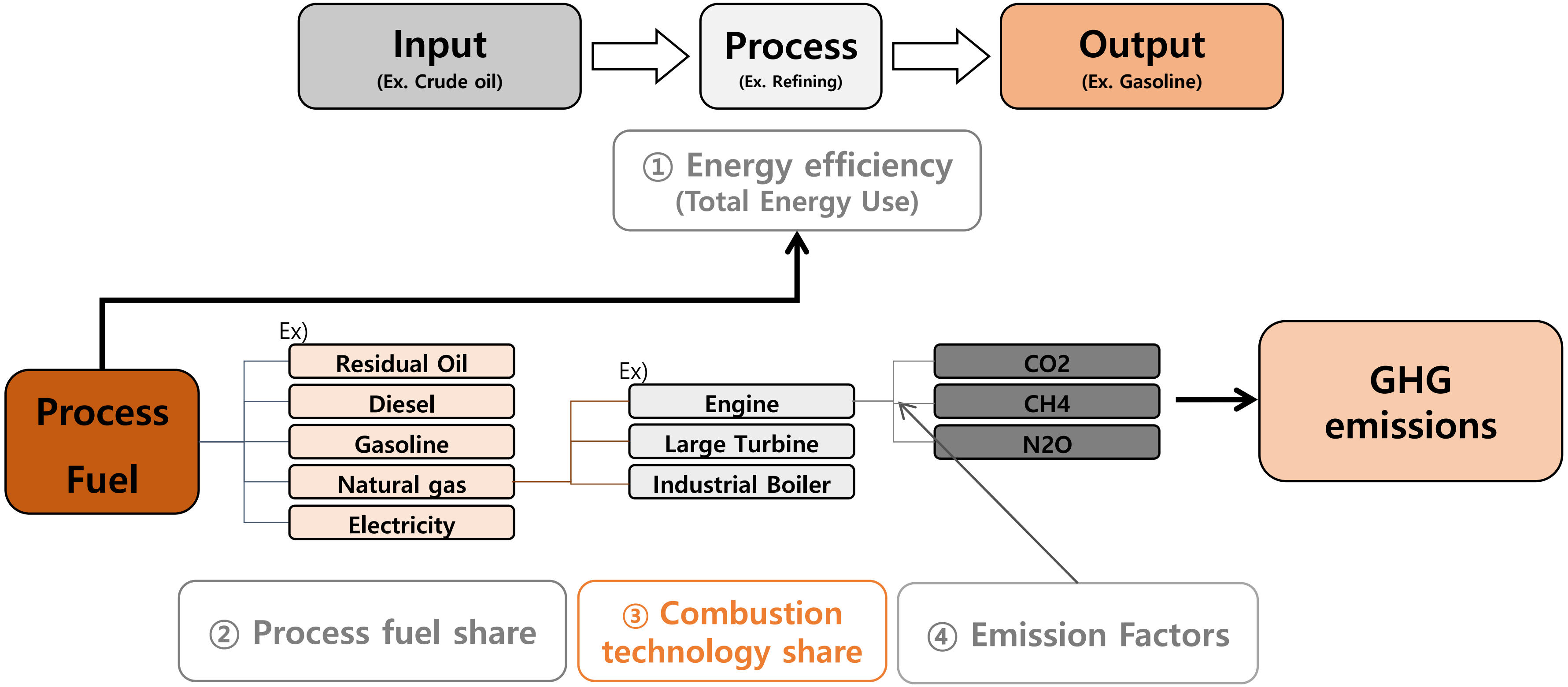
$$\therefore \frac{\textbf{Energy of Process fuel}}{\textbf{Energy of Product}} = \textbf{0.04603} = \textbf{46030 kJ/GJ}_{\textbf{product}}$$

각 Process fuel의 Energy use		
Residual Oil	10%	4603 $kJ/GJ_{Product}$
Diesel	27.3%	12566 $kJ/GJ_{Product}$
Natural gas	48.6%	22371 $kJ/GJ_{Product}$
Electricity	12.6%	5800 $kJ/GJ_{Product}$
Pet coke	1.5%	690 $kJ/GJ_{Product}$

연소 배출량 기본 계산 구조

- 각 과정의 Energy use 및 GHG emission 값 계산 구조





② Combustion technology share

탄소중립연구원 Carbon Neutral Research Institute

- 각 Combustion technology로 부터 만들어진 에너지량 계산

각 Process fuel의 Energy use		
Residual Oil	10%	4603 kJ/$GJ_{Product}$
Diesel	27.3%	12566 kJ/$GJ_{Product}$
Natural gas	48.6%	22371 kJ/$GJ_{Product}$
Electricity	12.6%	5800 kJ/$GJ_{Product}$
Pet coke	1.5%	690 kJ/$GJ_{Product}$

	Gasoline Refining
Residual oil industrial boiler	100.0%
Diesel commercial boiler	33.0%
Diesel stationary engine	33.0%
Diesel turbine	34.0%
NG large turbine	25.0%
NG large industrial boiler	60.0%
NG small industrial boiler	15.0%
Pet coke industrial boiler	100.0%

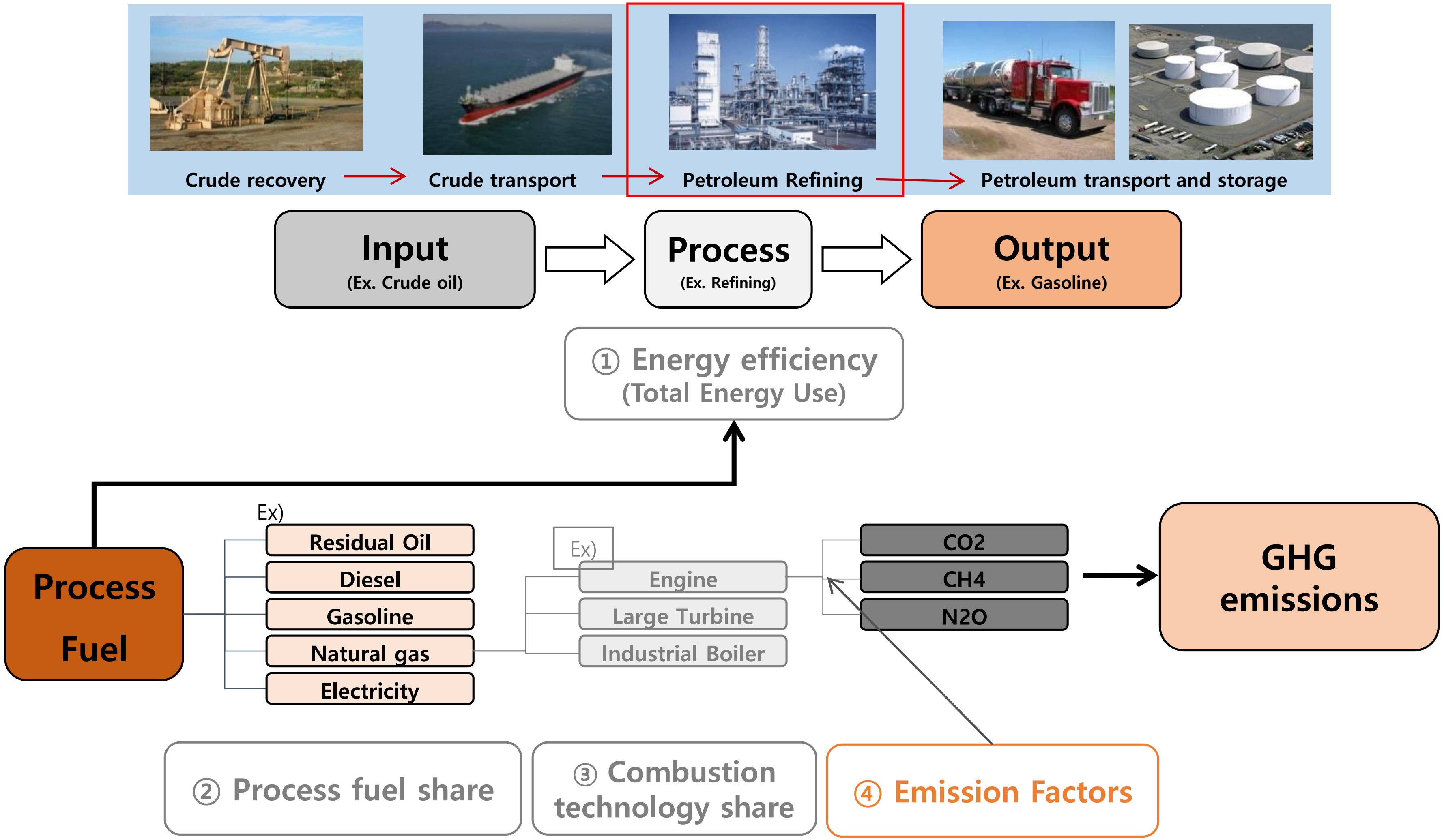
Combustion technology share 예시 (GREET)

각 Combustion technology의 Energy use			
Residual Oil	Industrial boiler	100%	4603 kJ/$GJ_{Product}$
Diesel	Commercial boiler	33%	4146.8 kJ/$GJ_{Product}$
	Stationary engine	33%	4146.8 kJ/$GJ_{Product}$
	Turbine	34%	4272.4 kJ/$GJ_{Product}$
Natural gas	Large turbine	25%	5592.8 kJ/$GJ_{Product}$
	Large industrial boiler	60%	13422.6 kJ/$GJ_{Product}$
	Small industrial boiler	15%	3355.7 kJ/$GJ_{Product}$
Electricity		100%	5800 kJ/$GJ_{Product}$
Pet coke	Industrial boiler	100%	690 kJ/$GJ_{Product}$

연소 배출량 기본 계산 구조

탄소중립연구원
Carbon Neutral Research Institute

- 각 과정의 Energy use 및 GHG emission 값 계산 구조



③ Emission factor

- 각 Combustion technology의 emission factor를 이용하여 온실가스 량 계산

각 Combustion technology의 Energy use			
Residual Oil	Industrial boiler	100%	4603 kJ/$GJ_{Product}$
Diesel	Commercial boiler	33%	4146.8 kJ/$GJ_{Product}$
	Stationary engine	33%	4146.8 kJ/$GJ_{Product}$
	Turbine	34%	4272.4 kJ/$GJ_{Product}$
Natural gas	Large turbine	25%	5592.8 kJ/$GJ_{Product}$
	Large industrial boiler	60%	13422.6 kJ/$GJ_{Product}$
	Small industrial boiler	15%	3355.7 kJ/$GJ_{Product}$
Electricity		100%	5800 kJ/$GJ_{Product}$
Pet coke	Industrial boiler	100%	690 kJ/$GJ_{Product}$

Emission factor [g/GJ] :
각 연소 기술에 대하여 과정연료 1 GJ 연소 시 발생하는
온실가스 배출량 (U.S. EPA 1995)

	Commercial Boiler
VOC	1.173
CO	16.686
NOx	82.225
PM10	42.530
PM2.5	38.000
SOx	0.000
CH4	0.760
N2O	0.390
CO2	78,167

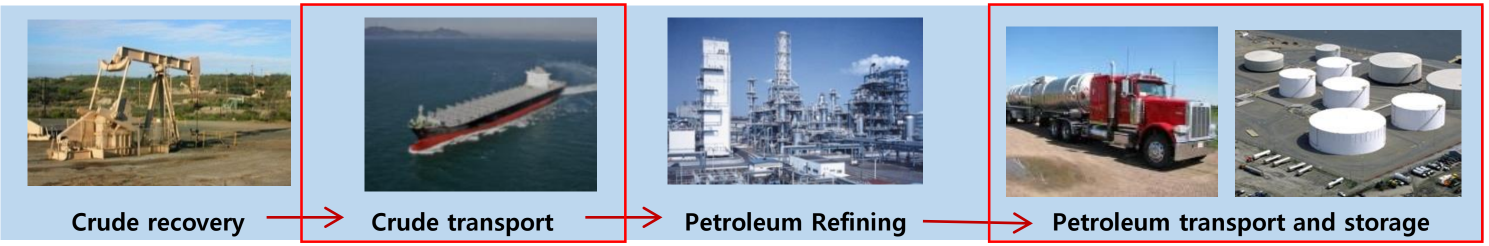
Emission Factor 예시
(GREET_ Diesel Commercial Boiler)

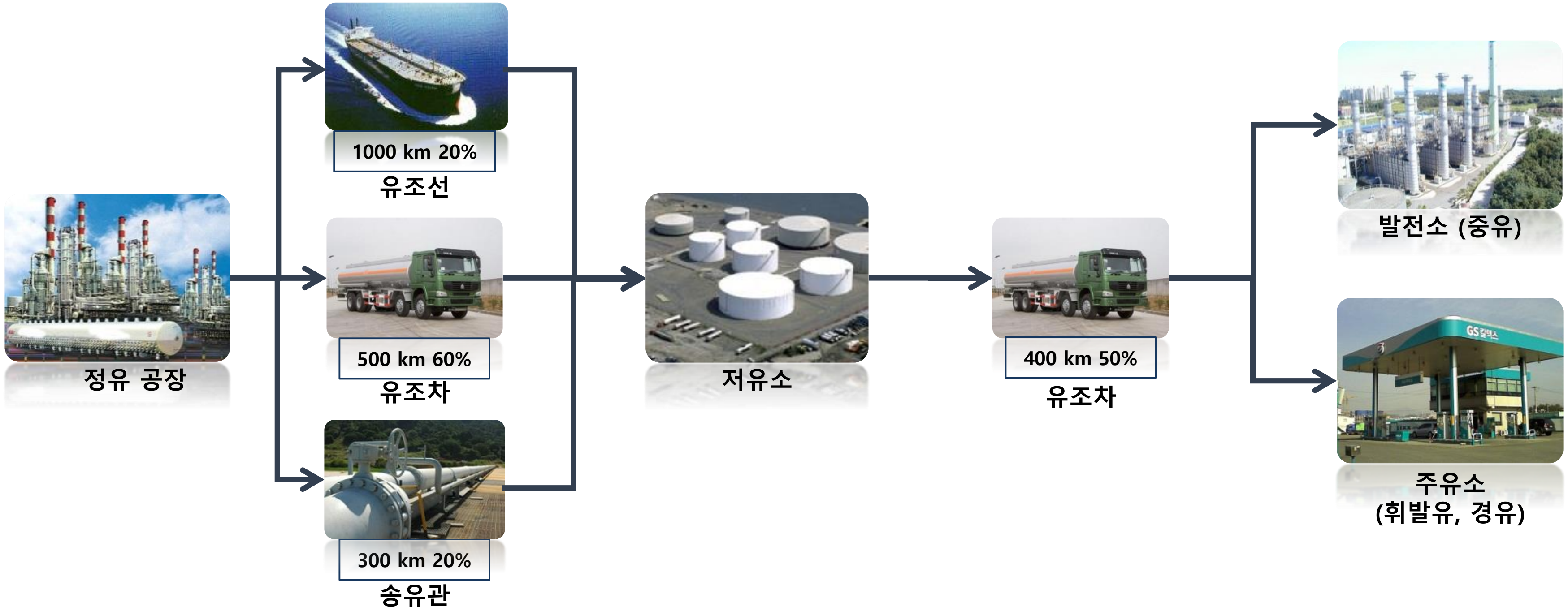
Diesel Commercial Boiler 온실가스 배출량	
CH4	0.00315 g/$GJ_{Product}$
N2O	0.00162 g/$GJ_{Product}$
CO2	324.143 g/$GJ_{Product}$
Total	324.704 g/$GJ_{Product}$

Transportation & Distribution

탄소중립연구원
Carbon Neutral Research Institute

- 다양한 운송수단 고려





Transportation & Distribution

● Energy use & GHG emission 계산 방법

T&D의 경우 다른 과정들과는 다른 parameter들이 Energy use 계산에 필요

- Energy intensity (kJ/ton·km), 이동거리, 적재량
- 각 운송수단의 Energy intensity에 이동거리와 적재량을 곱하여 총 Energy use 계산

Feedstock/Fuel	Conventional Gasoline
Transportation Mode	Ocean Tanker
Distance (km)	1,000
Share of Fuel Type Used:	
Diesel	0.0%
Residual Oil	100.0%
Natural Gas	
LPG	
Electricity	
Energy Intensity: kJ/ton-km	40
Energy Consumption: Btu/mmBtu of fuel trans	
Total energy	984.74

Fuel Transported (Tons)	Gasoline
Ocean Tanker	90,000
Barge	20,000
Heavy Heavy-Duty Truck	25
Medium Heavy-Duty Truck	

Energy use = Energy intensity X Distance X Cargo payload
= 40 kJ/ton-km X 1000 km X 90000 ton = 3600 GJ

Conventional Gasoline을 1GJ 옮길 때 드는 에너지

$$\therefore \text{Energy use} = \frac{3600\ \text{GJ}}{90000\ \text{ton X } 40.62\ \text{GJ/ton}} = 984.74\ \text{kJ/GJ}_{\text{product}}$$

*40.62 GJ/ton = 순발열량(LHV, Lower Heating Value)

Energy use 에서부터 GHG emission 계산하는 과정은 앞의 과정들과 같음

Feed Loss

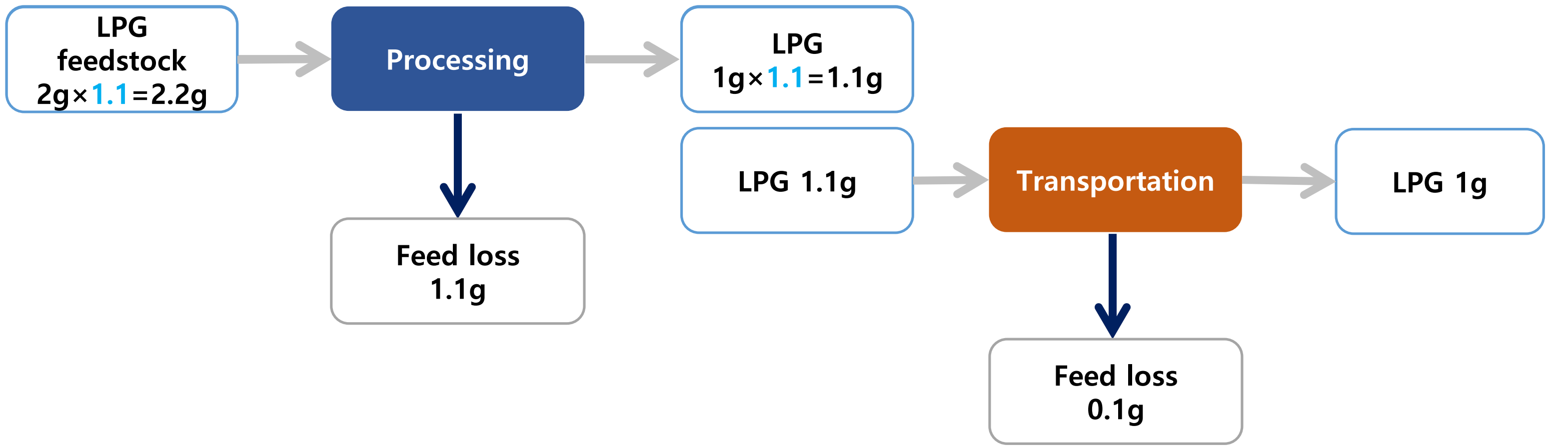
● Feed loss 에 의한 요인 계산

Leakage, Venting, Evaporation, Spillage 등에 의해 Feed loss가 일어날 수 있음

- Feed loss는 최종 product 단위 량을 만드는 데에 더 많은 Energy use와 GHG emission을 야기

Loss Factor의 정의 : $\dfrac{\text{Amount of LPG as a product + LPG feed loss}}{\text{Amount of LPG as a product}}$

Ex) [Processing] Loss factor = 2 / [Transportation] Loss factor = 1.1



Loss factor

- **전 과정의 Energy use 와 GHG emissions 를 계산할 때 Loss factor 사용**

Ex) LPG process

	LPG Transportation and Distribution	LPG Storage
Loss factor	1.003	1.006
CH_4	2.498	1.032

1.003×1.006GJ → LPG Transportation and Distribution → 1.006GJ : CH4 2.498×1.006g

1.006GJ → LPG Storage → 1GJ : CH4 1.032g

Loss factors

$$\therefore CH_4 \text{ Total emissions } = 2.498 \times \boxed{1.006} + 1.032$$

공정연료 전과정 배출량 기본 계산 구조

- **해당 공정 연료의 생산에서부터 최종 분배까지의 총 배출량을 고려**

Ex) Conventional diesel

	Refining	T&D	Storage
Loss factor	1.000	1.002	1.001
CO_2	6,018	383	125

Conventional diesel Life cycle CO_2 emission $= 6{,}018 \times 1.002 \times 1.001 + 383 \times 1.001 + 125 = 6{,}544.4$

<공정 연료 Life cycle emission DB>

	Crude oil	Gasoline	Diesel	…
Loss factor	N/A	1.001	1.000	…
CO_2	3,390	7,439	6,544.4	…

위 방식과 같은 로직
으로 계산된 결과값

Conventional diesel을 공정 연료로 사용 시 전과정 배출량
-> Energy use X (3,390 X 1.000 + 6,544.4)