

ΠΜΣ στη Βιομηχανική Διοίκηση & Τεχνολογία

Κατεύθυνση: Διαχείριση Ενέργειας και Περιβάλλοντος

Μάθημα: Π-ΕΚΕ303 ΕΝΑΛΛΑΚΤΙΚΑ ΚΑΥΣΙΜΑ ΚΑΙ ΕΦΑΡΜΟΓΕΣ POWER TO X

# **Power-to-X: Η τεχνολογία κλειδί για την αξιοποίηση των ΑΠΕ**

21/12/2023

Δημήτριος Σιδηράς  
Καθηγητής



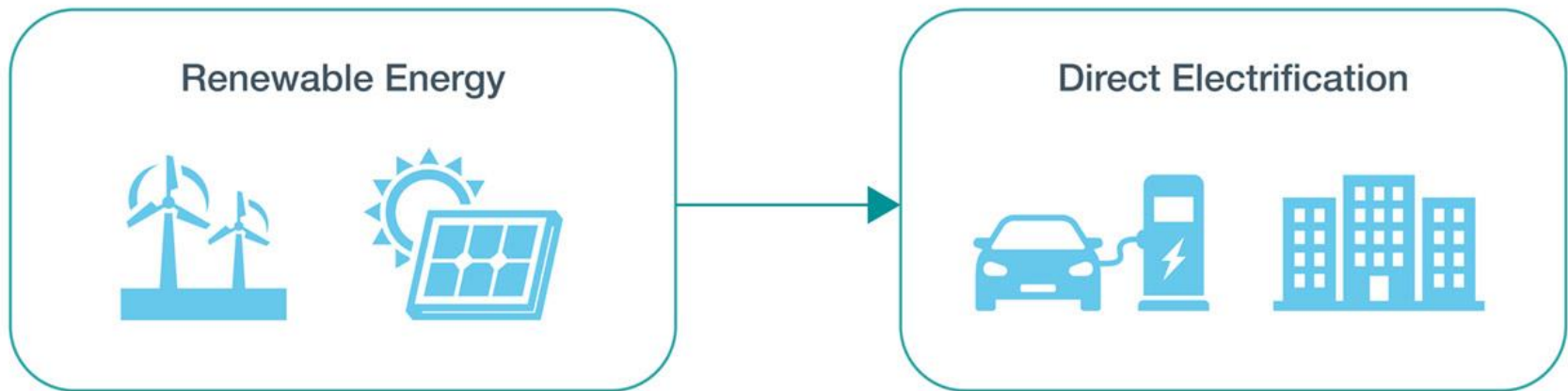
## **Power-to-X: Η τεχνολογία κλειδί για την αξιοποίηση των ΑΠΕ**

**(also known as PtX or P2X)**

Μία από τις νέες τεχνολογίες που αλλάζουν το παιχνίδι, το Power-to-X είναι ένας όρος που καλύπτει διαφορετικές διαδικασίες που μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια σε θερμότητα, υδρογόνο ή συνθετικά καύσιμα, πράγμα που σημαίνει ότι όλο και περισσότερο το ενεργειακό μας σύστημα μπορεί να αποχαιρετήσει στον άνθρακα, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο.

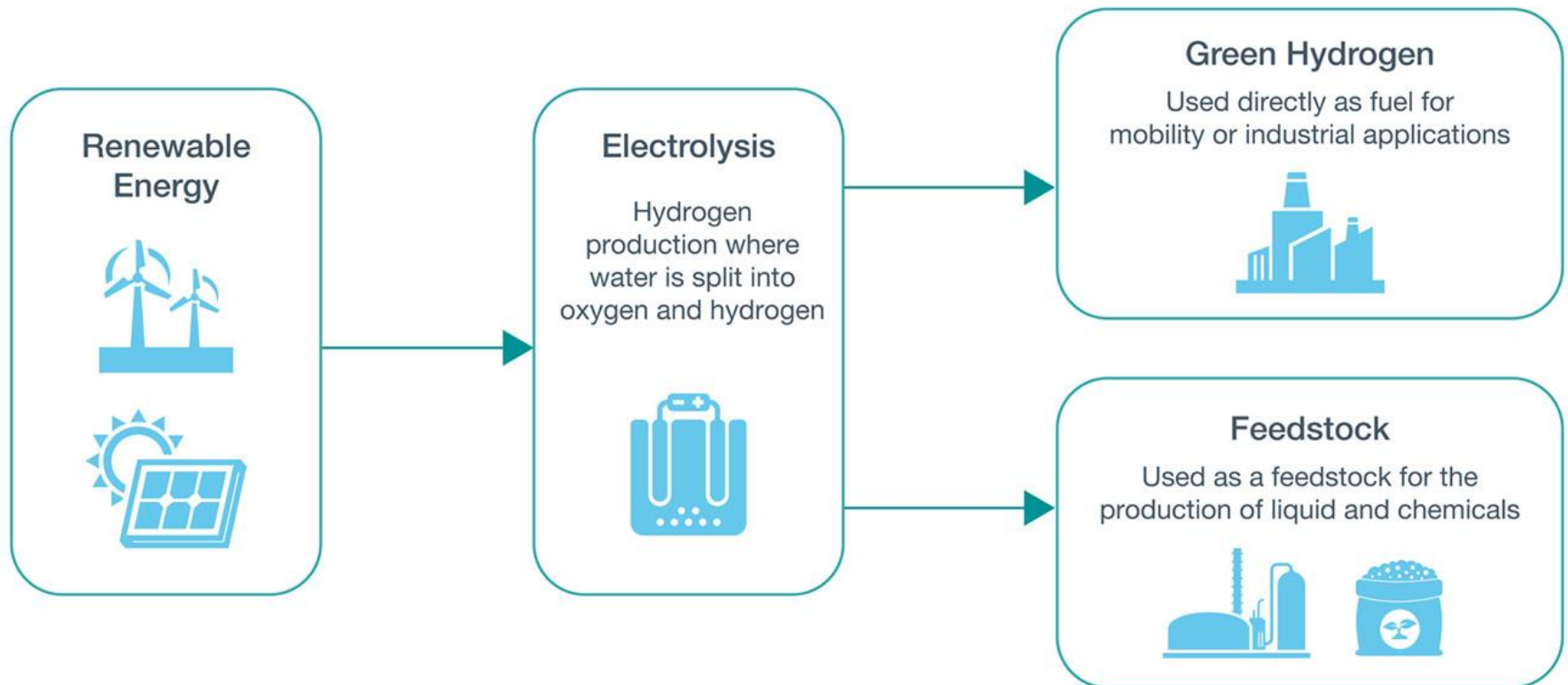
## Power-to-X direct electrification routes

---



## Power-to-X indirect electrification routes

---



# Power - to - X

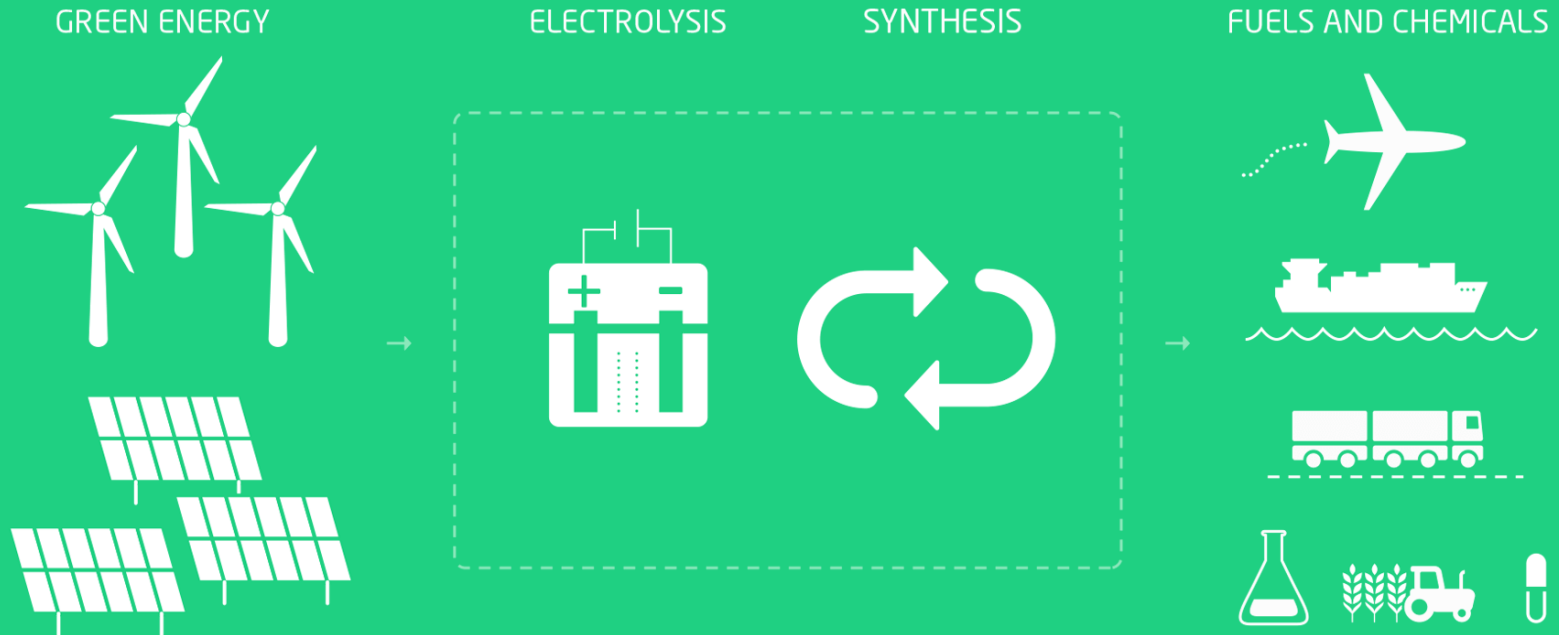
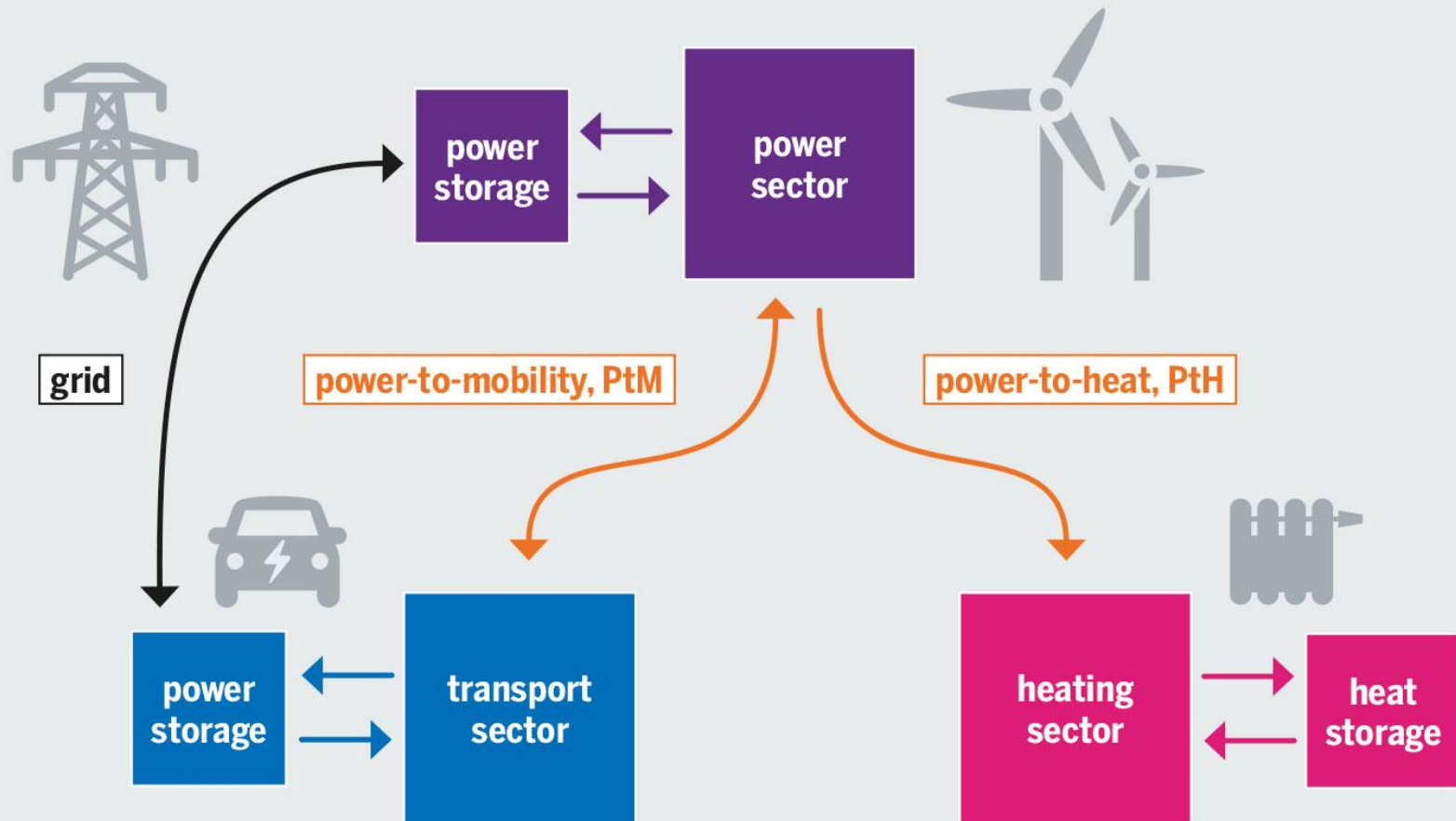
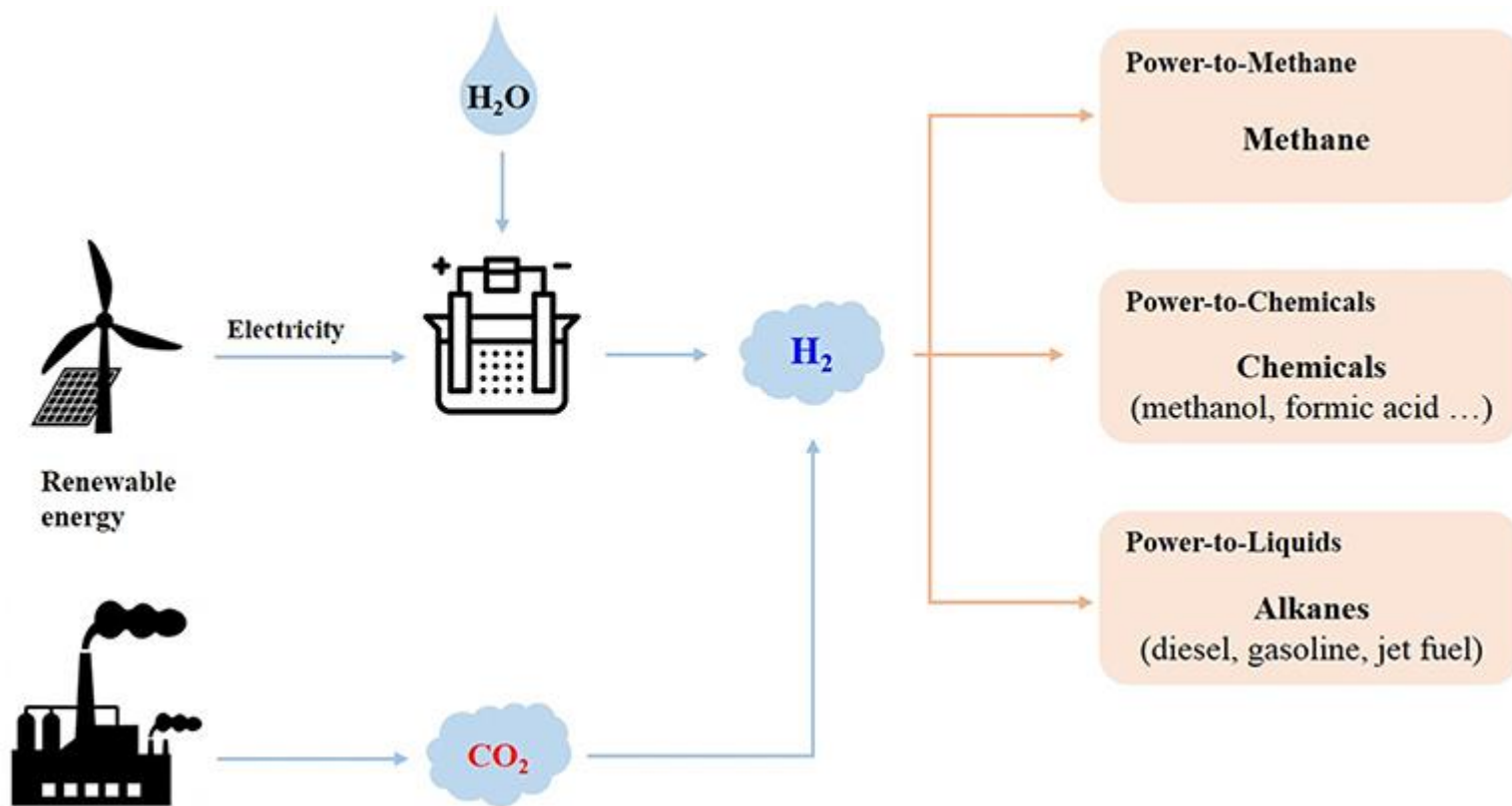


Illustration showing the individual parts of Power-to-X.

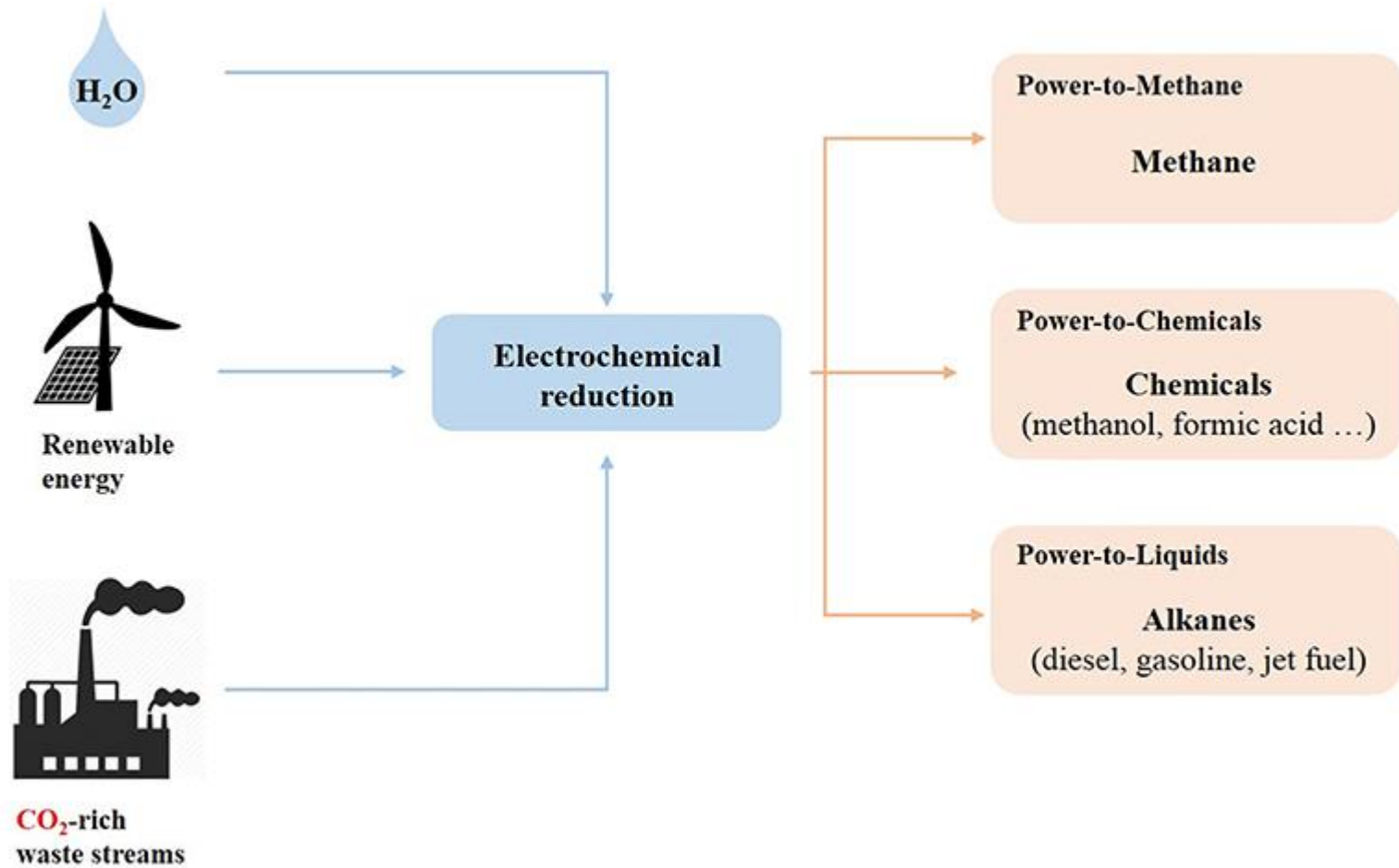
## TRANSFORMATION IN JOINING UP SECTORS

Scheme of coupled sectors and major linking “power-to-X” technologies



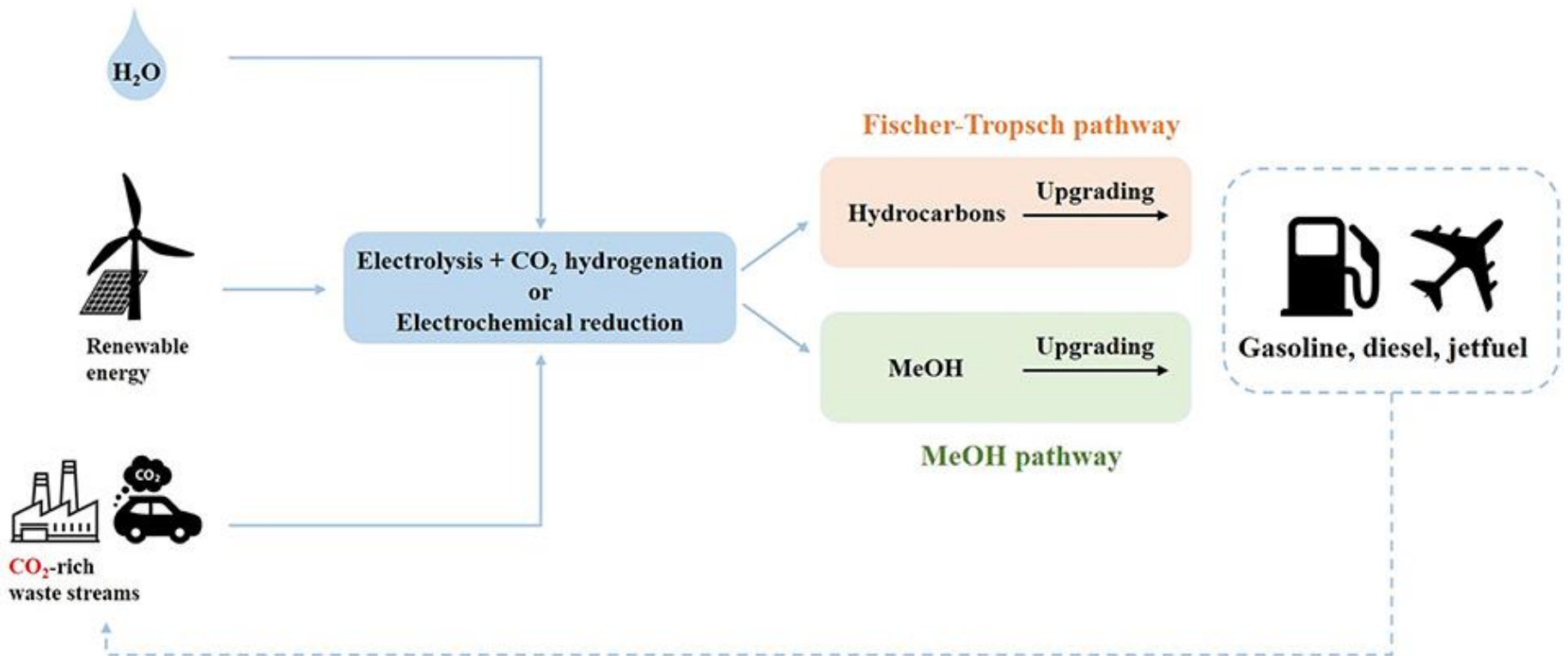


Power-to-X via CO<sub>2</sub> hydrogenation.

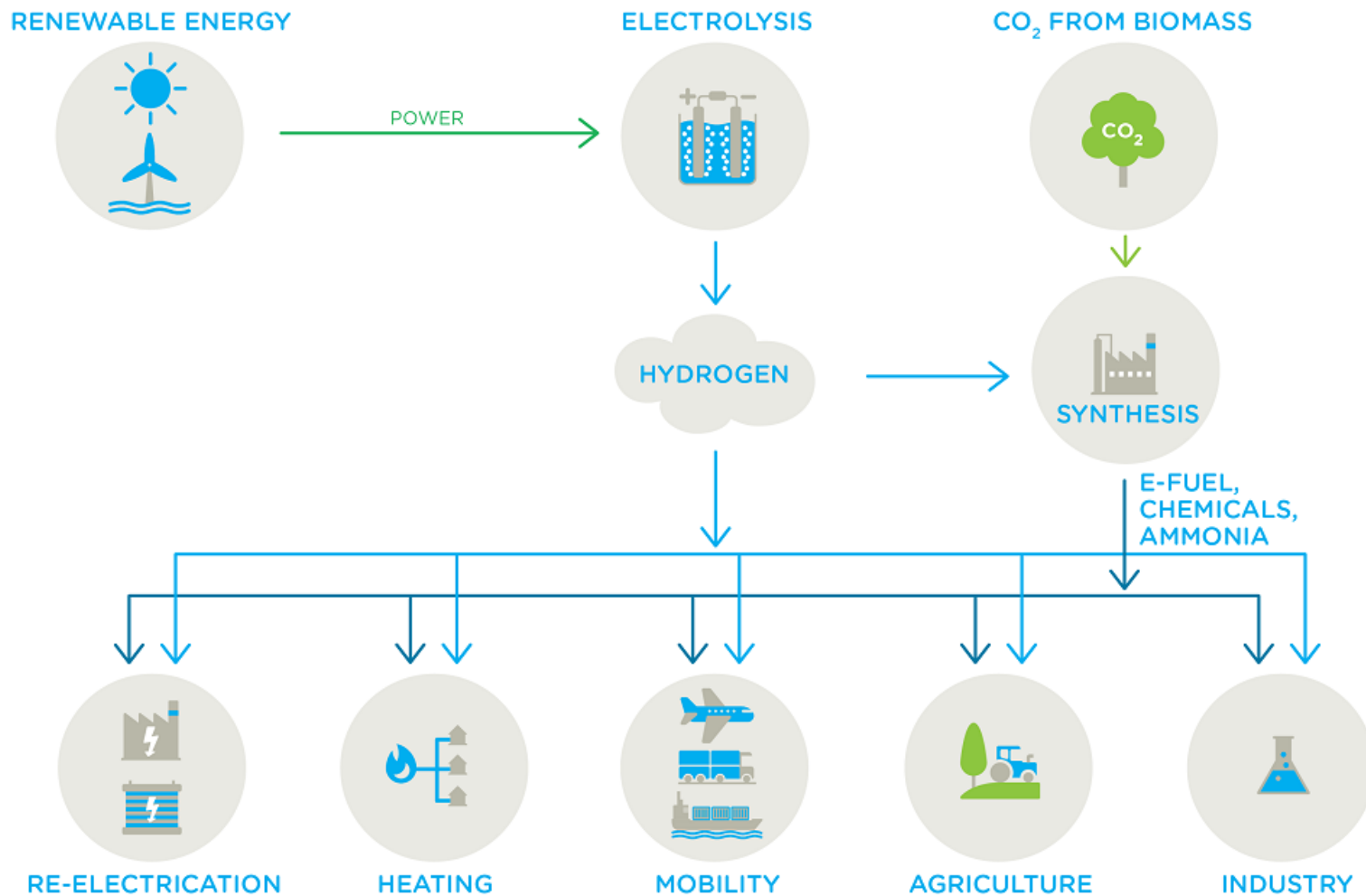


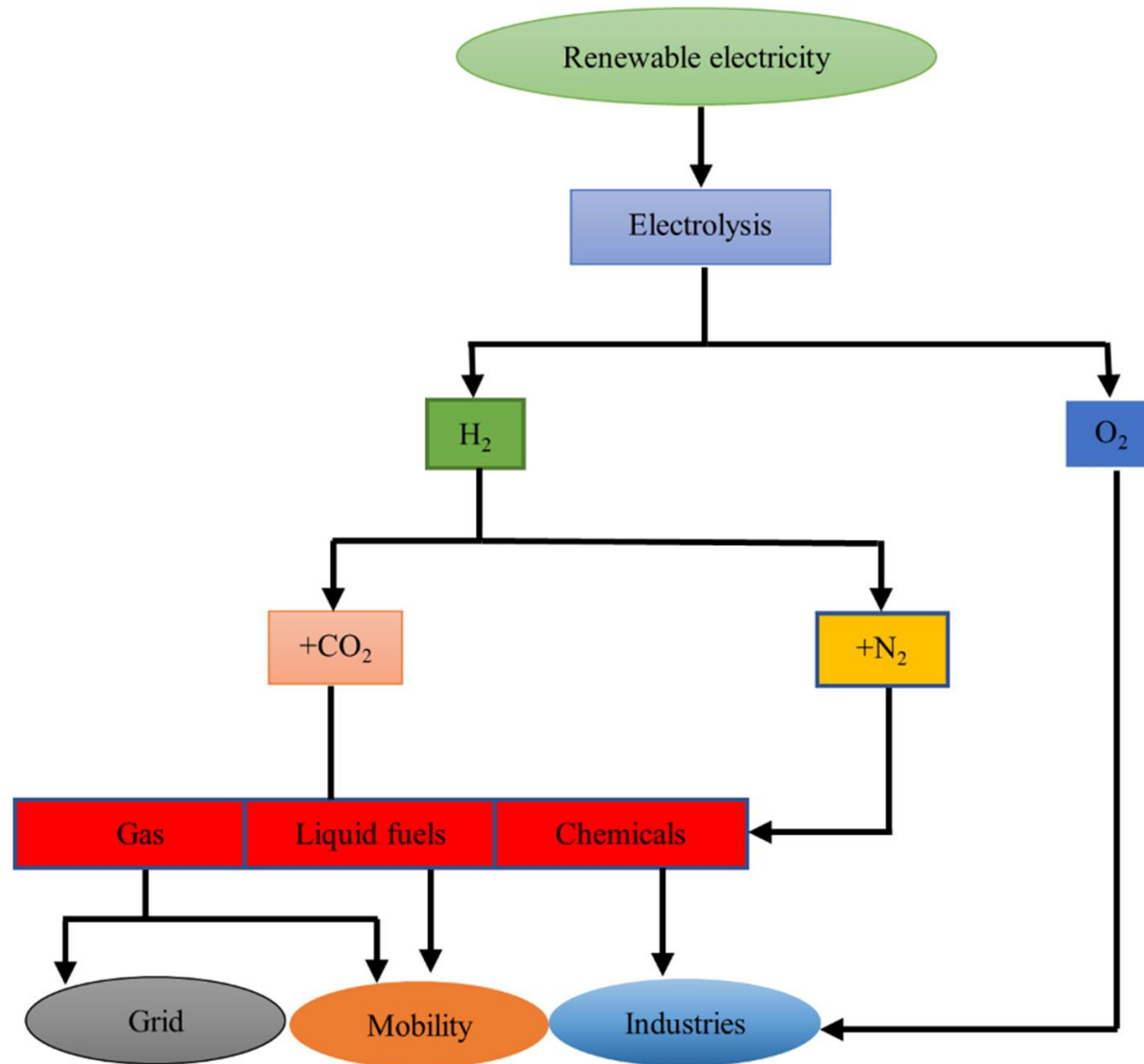
Power-to-X via electrochemical reduction.



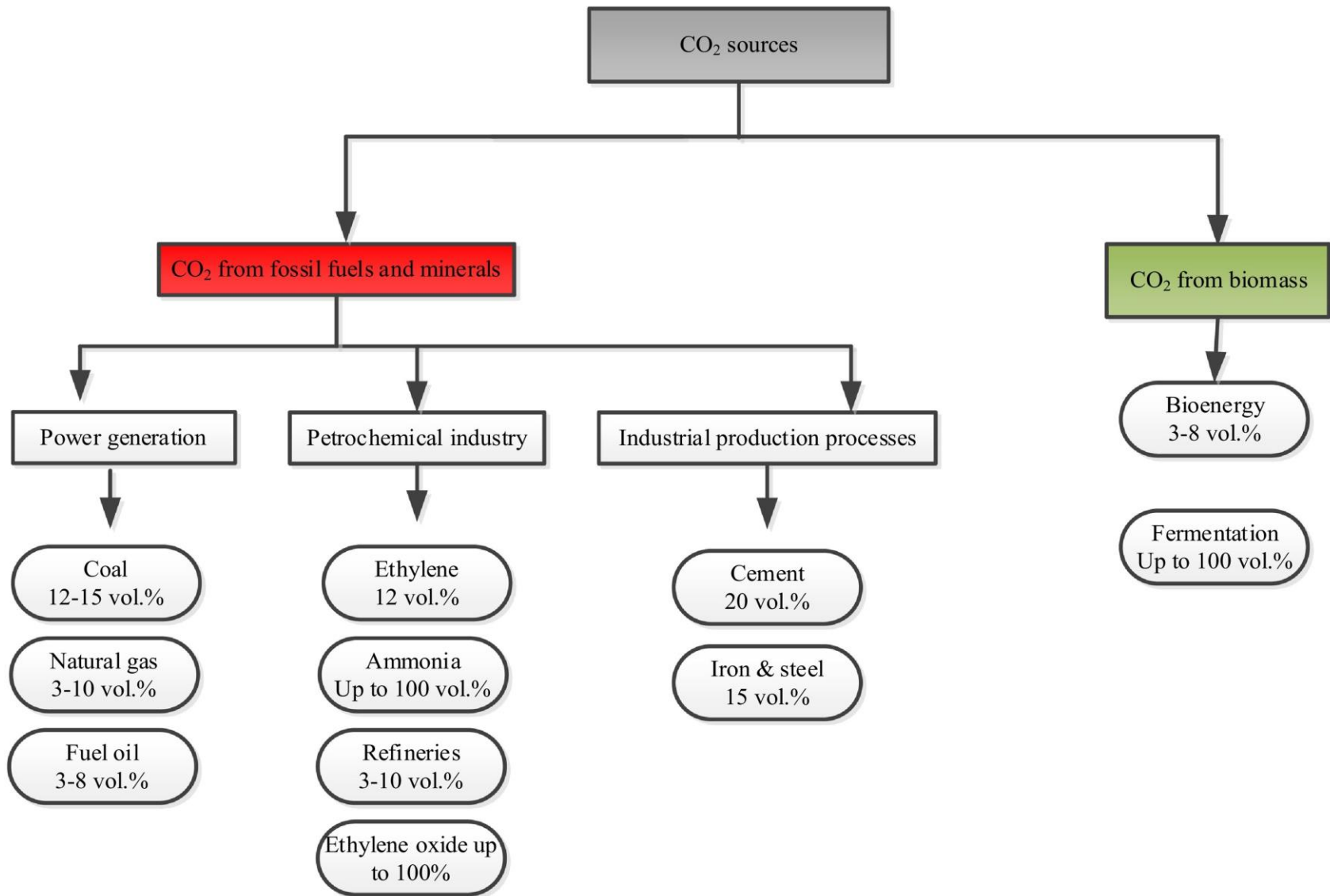


Power-to-Liquids (PtL) technology.

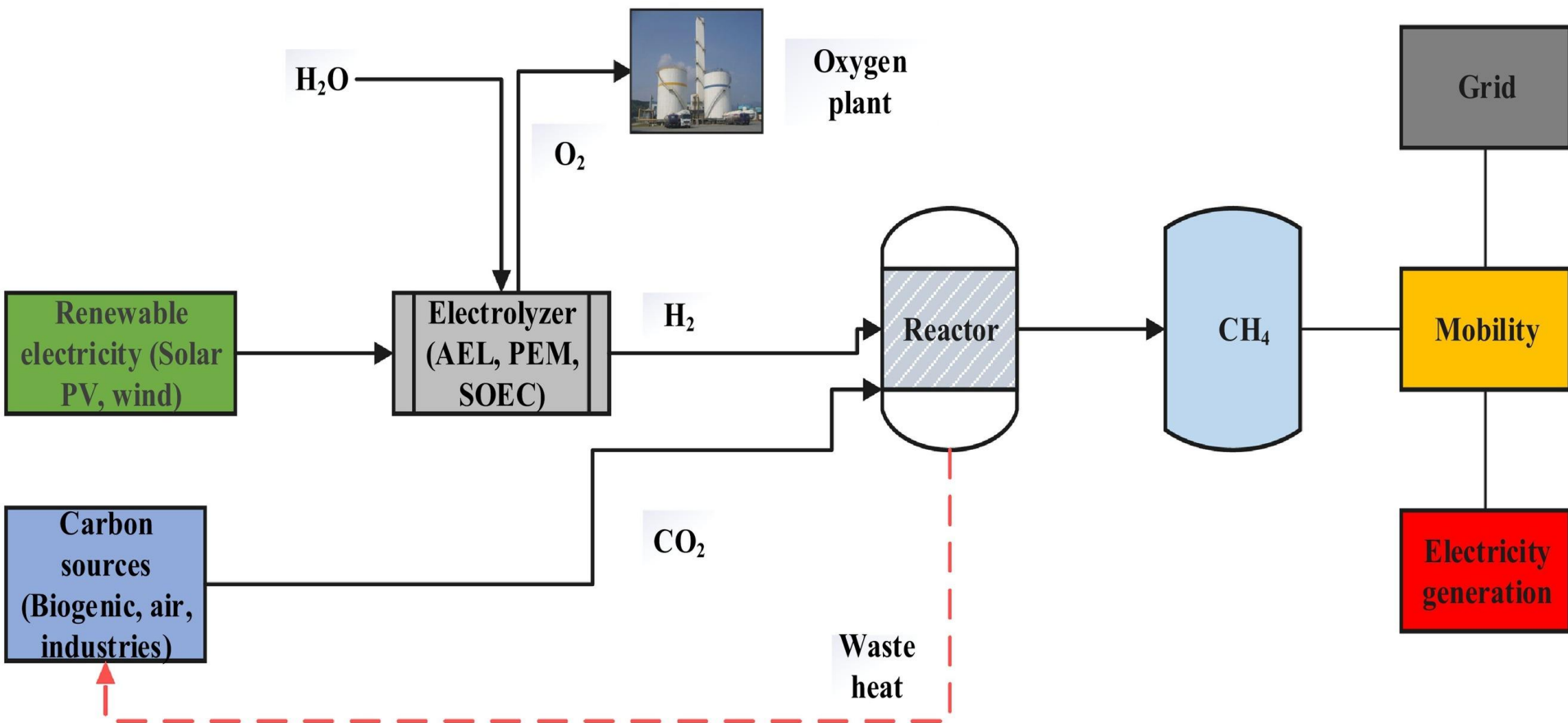




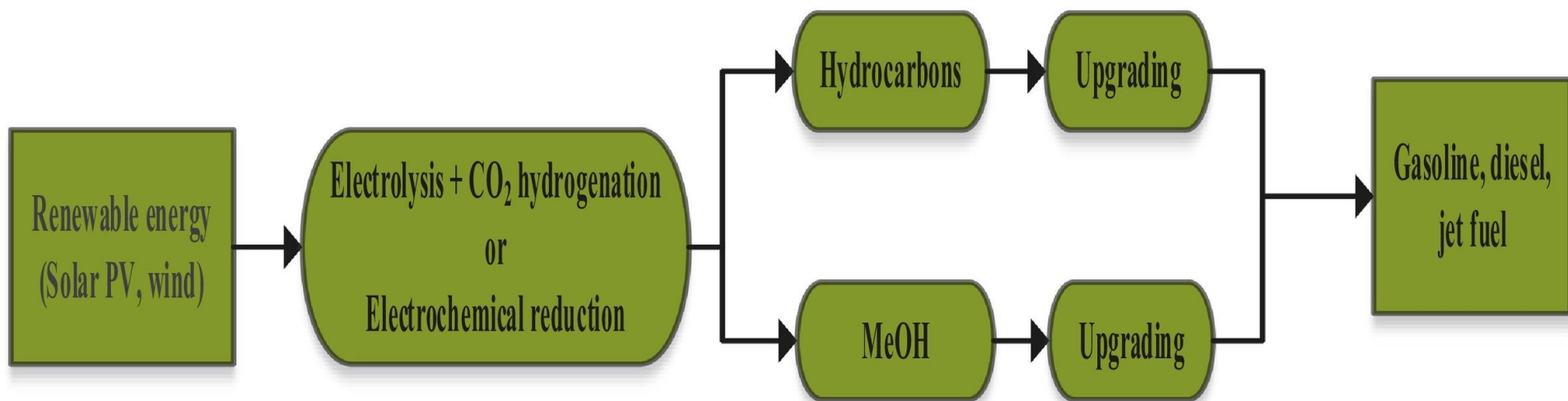
Schematic representation of the P2X conversion pathways.



CO<sub>2</sub> sources and related concentrations data compiled from IPCC report



A typical schematic representation of P2G.



A schematic of P2L pathways

# **Power-to-X technologies**

Power-to-X technologies can be subdivided according to intended use or form of energy.

## **Power-to-X technologies by usage:**

- Power-to-Fuel
- Power-to-Chemicals
- Power-to-Ammonia
- Power-to-Power
- Power-to-Protein
- Power-to-Syngas

## **Power-to-X technologies by energy form:**

- Power-to-Gas
- Power-to-Liquid
- Power-to-Heat

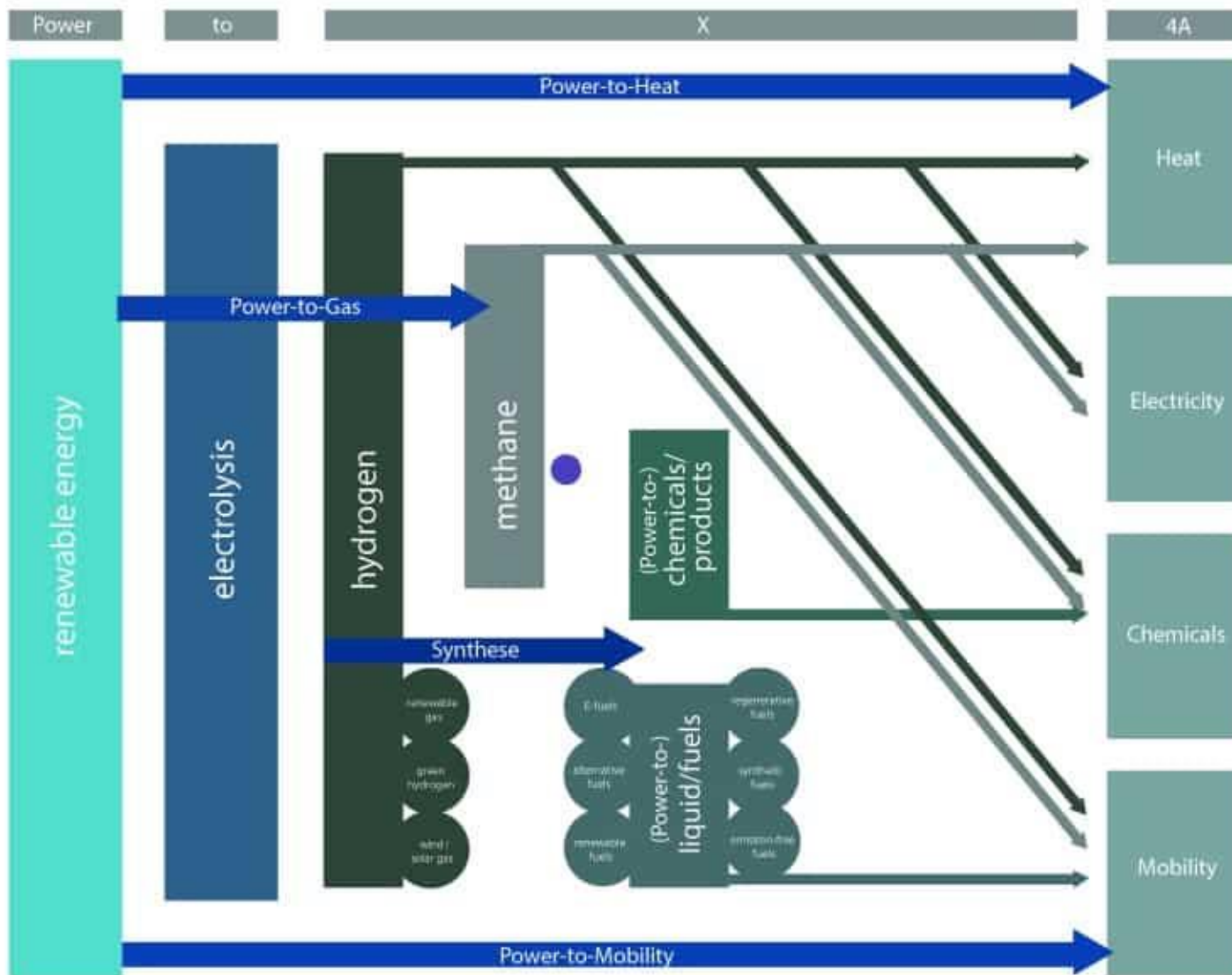
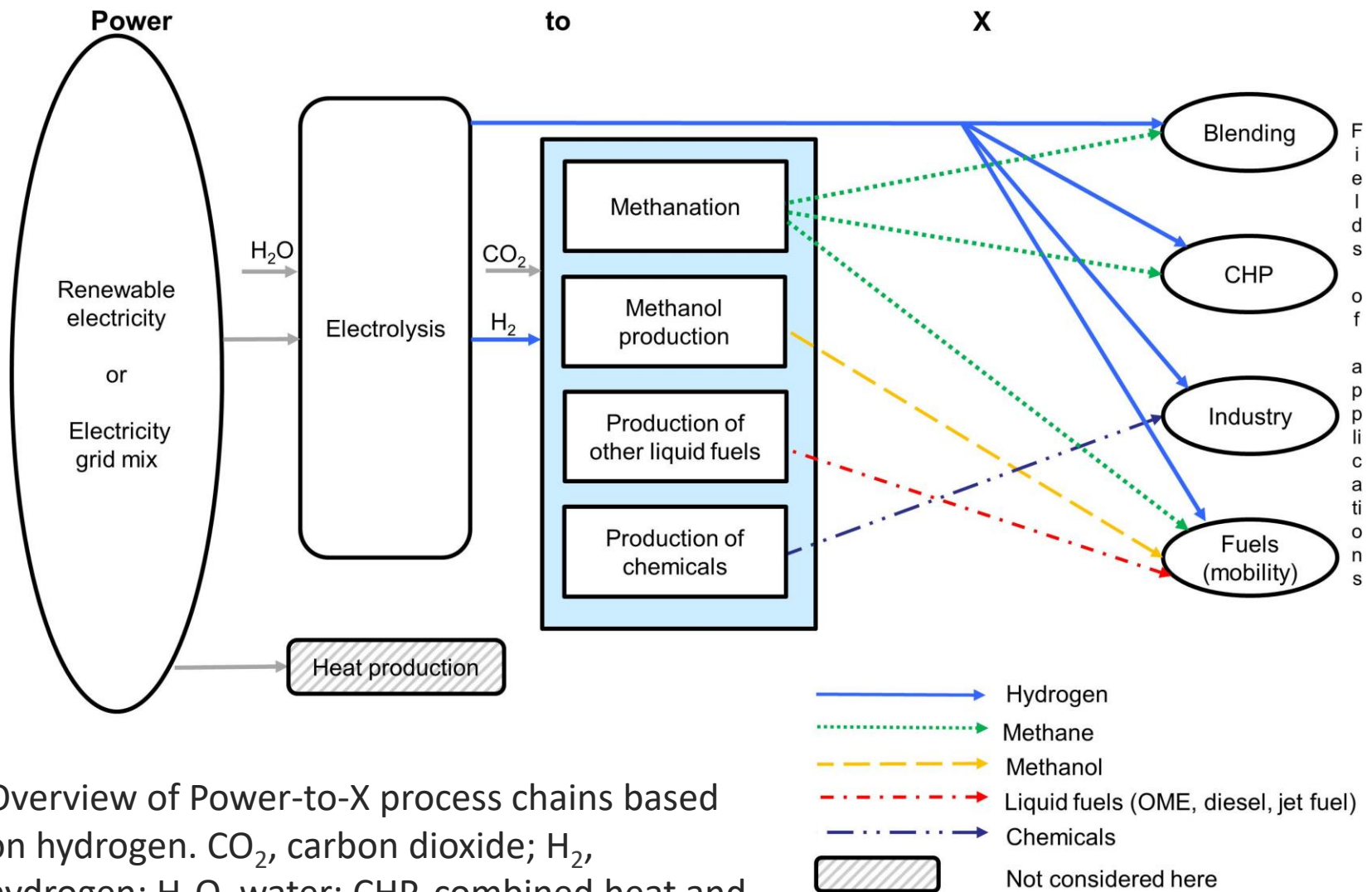
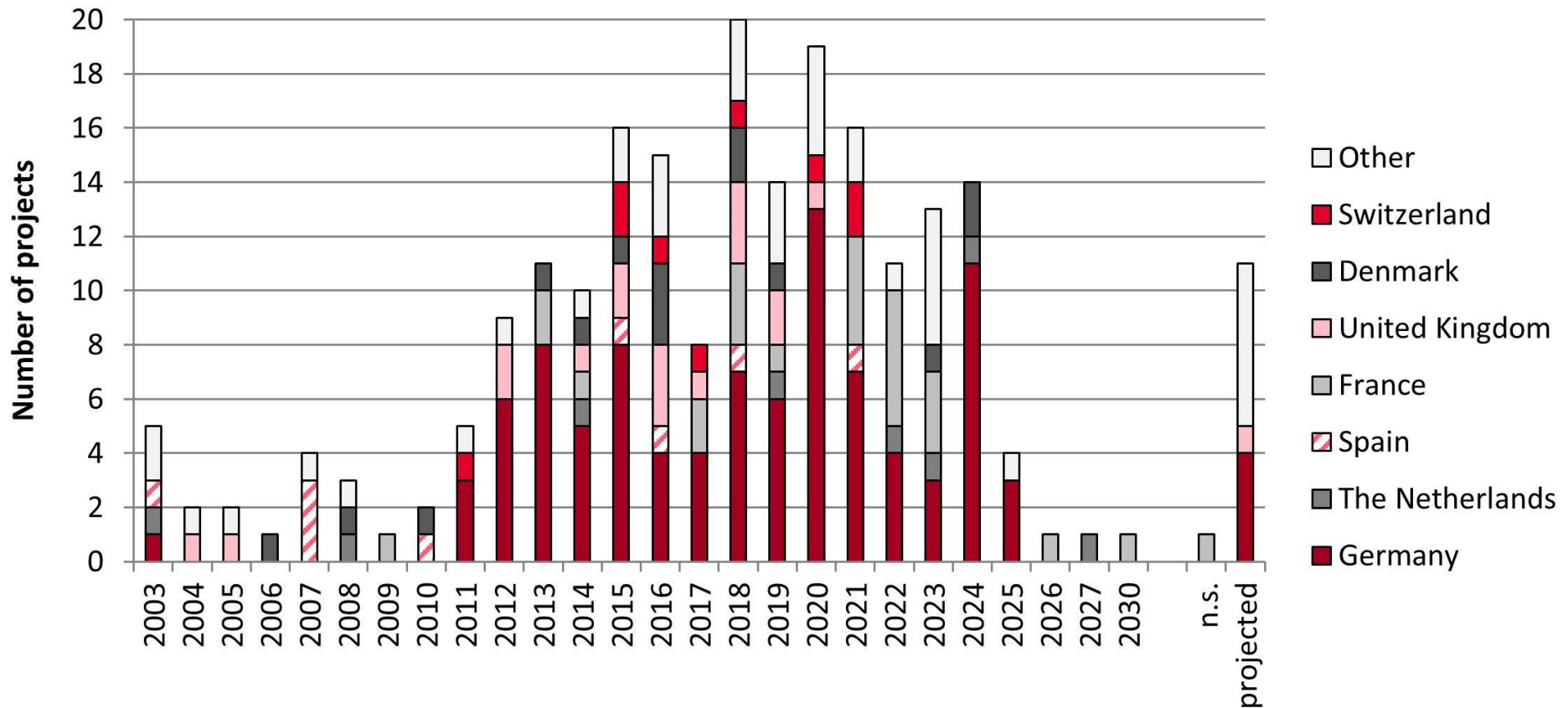


Illustration of power-to-X processes, products and applications;

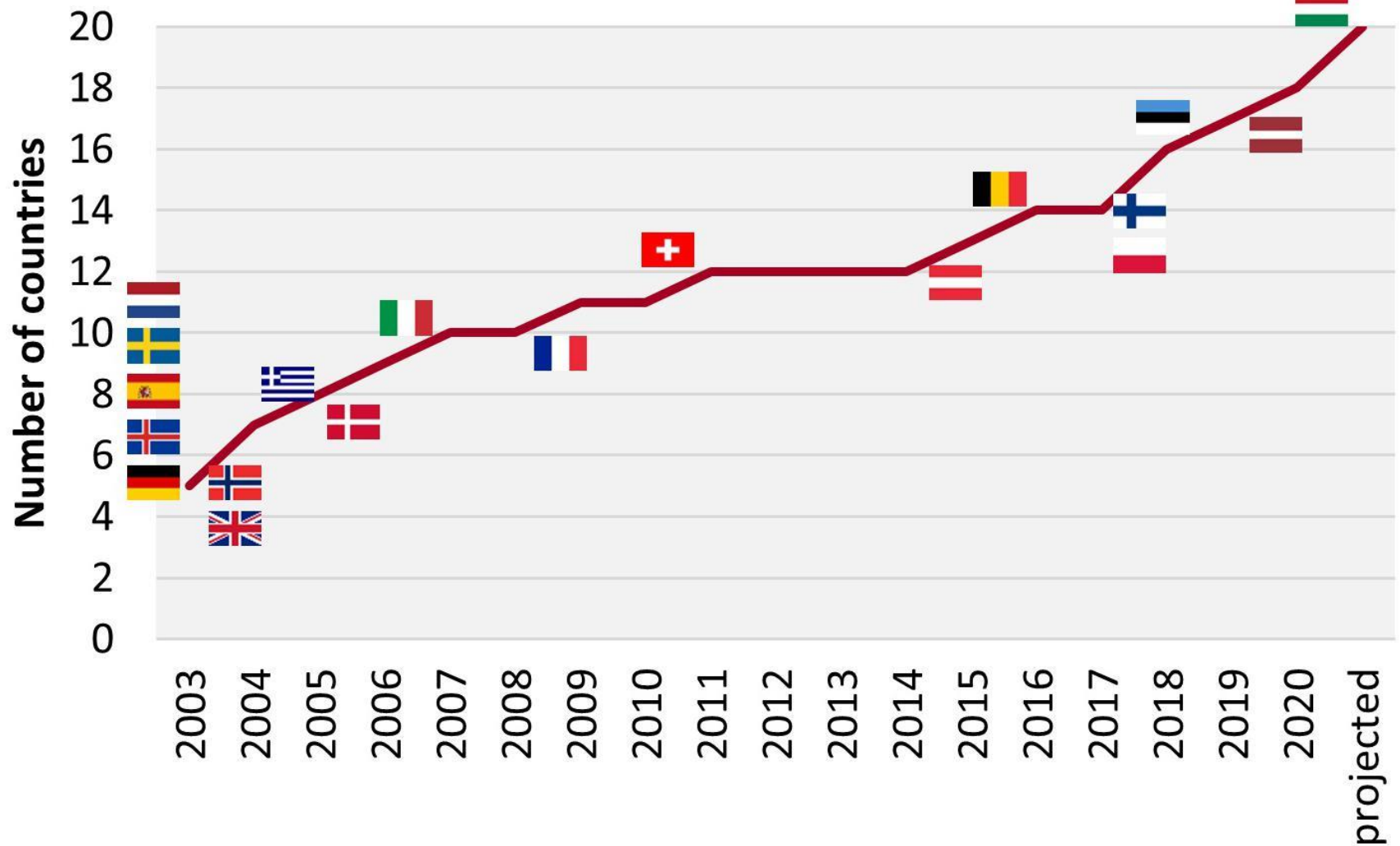




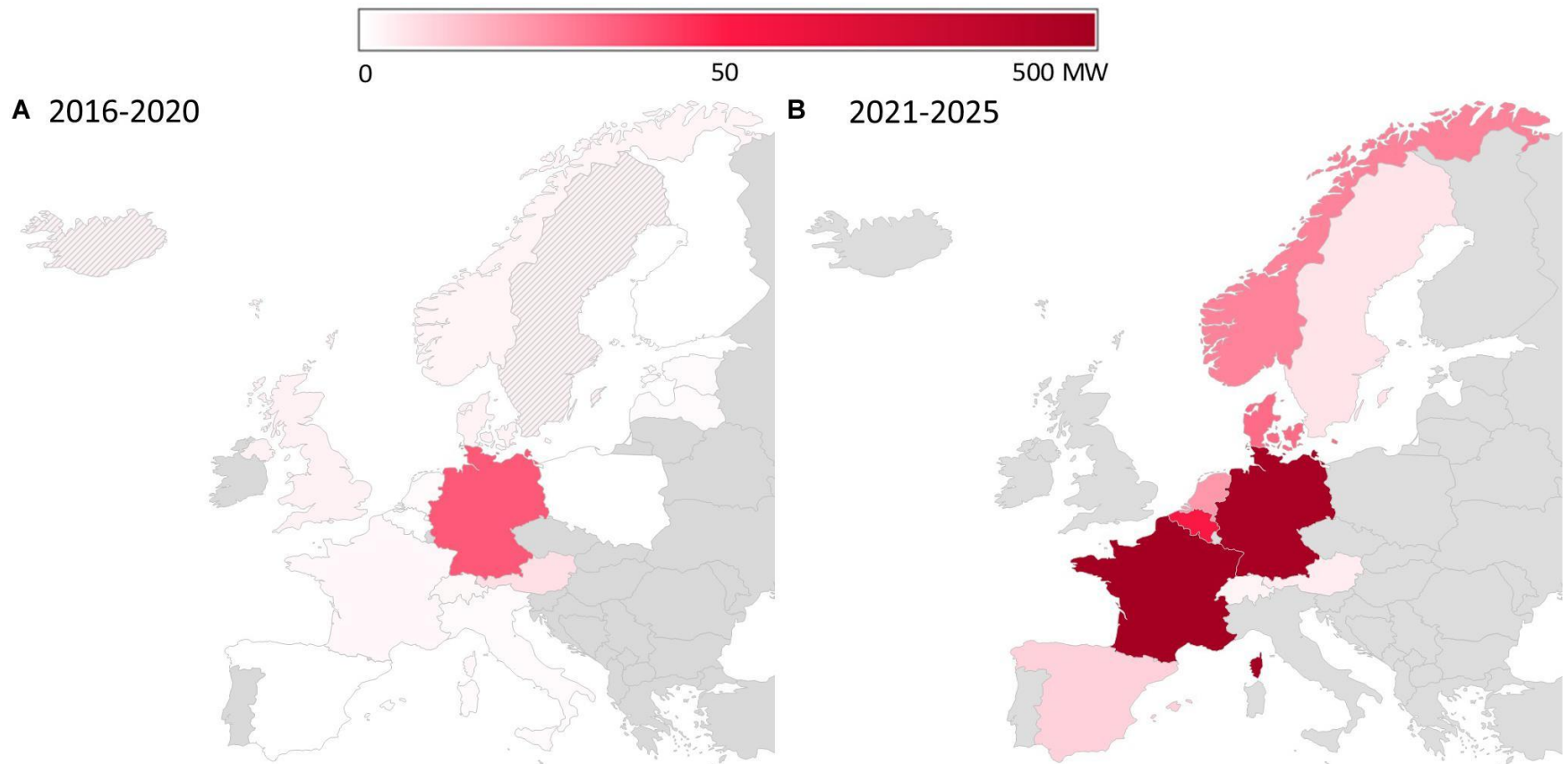
Overview of Power-to-X process chains based on hydrogen. CO<sub>2</sub>, carbon dioxide; H<sub>2</sub>, hydrogen; H<sub>2</sub>O, water; CHP, combined heat and power; OME, polyoxymethylene dimethyl ether.



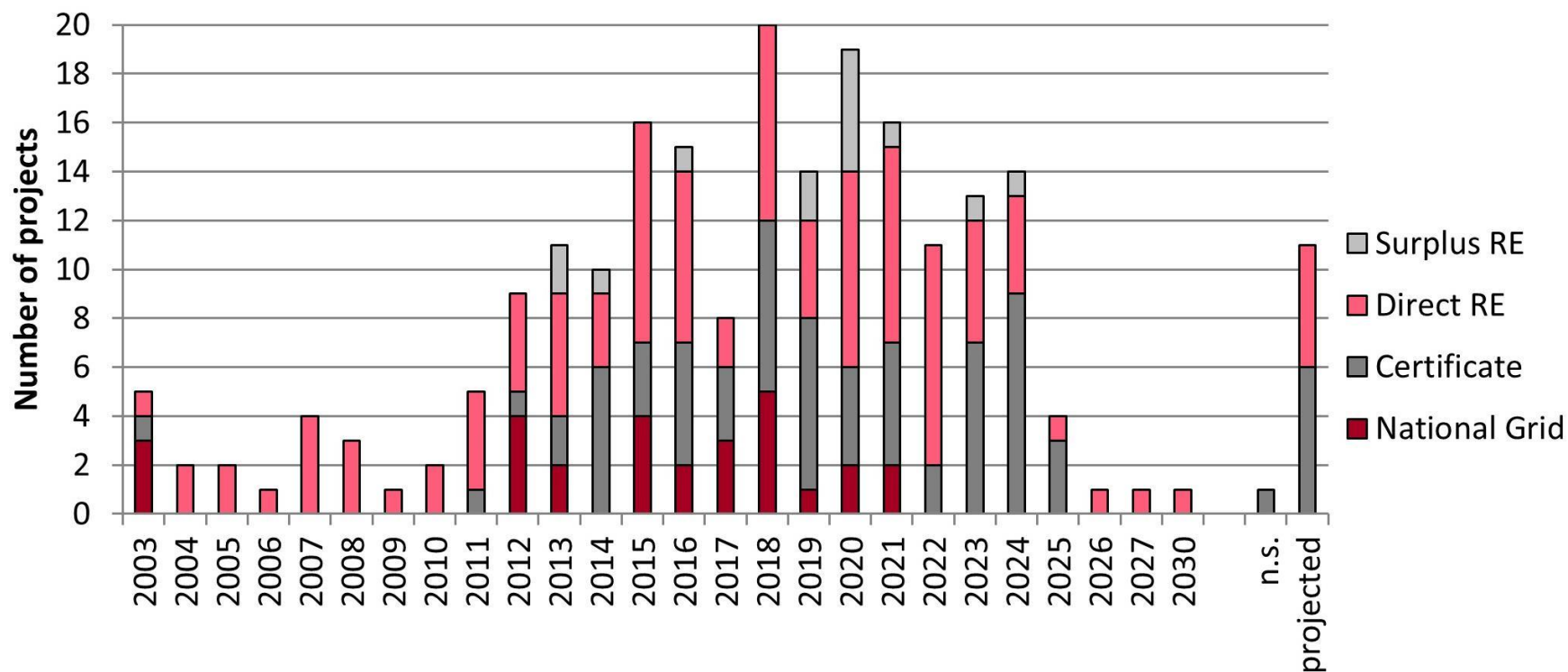
Historical development of Power-to-X projects commissioned in Europe with regard to the countries involved; year for commissioning not specified (n.s.).



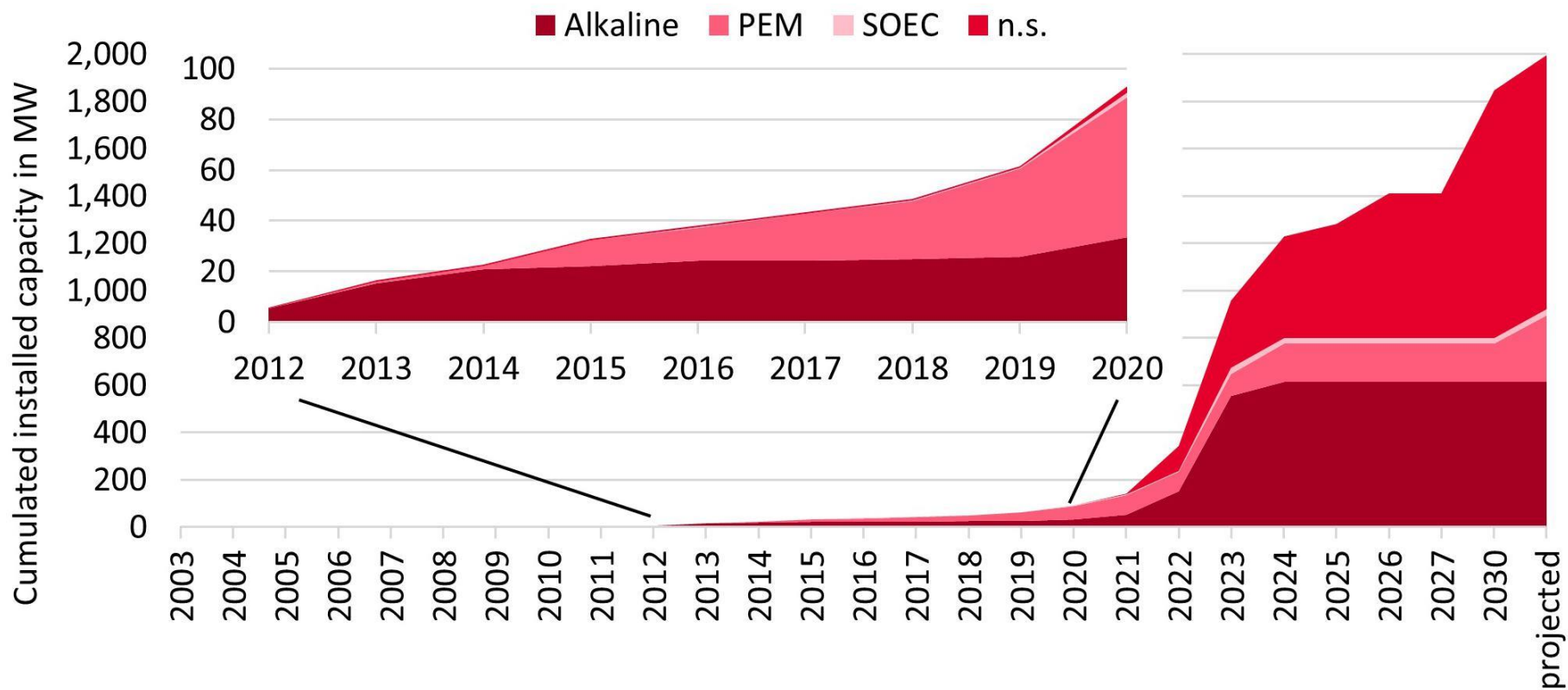
Historical development of the involvement of countries in Power-to-X projects.



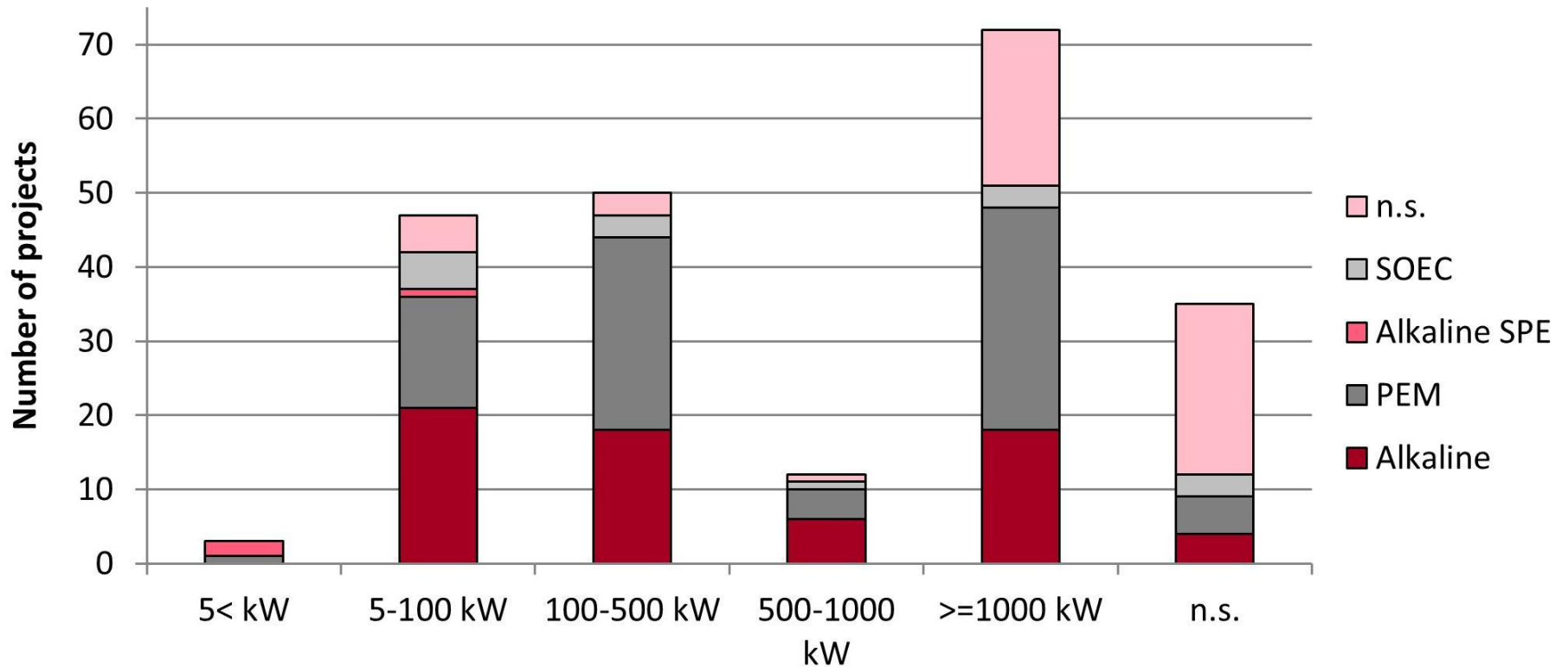
Newly installed capacities of Power-to-X projects in Europe, **(A)** commissioned between 2016 and 2020, **(B)** planned for 2021–2025. Shaded countries: installed capacity not specified, gray countries: no Power-to-X projects.



Historical development of Power-to-X projects with regard to electricity supply. RE, renewable energy.

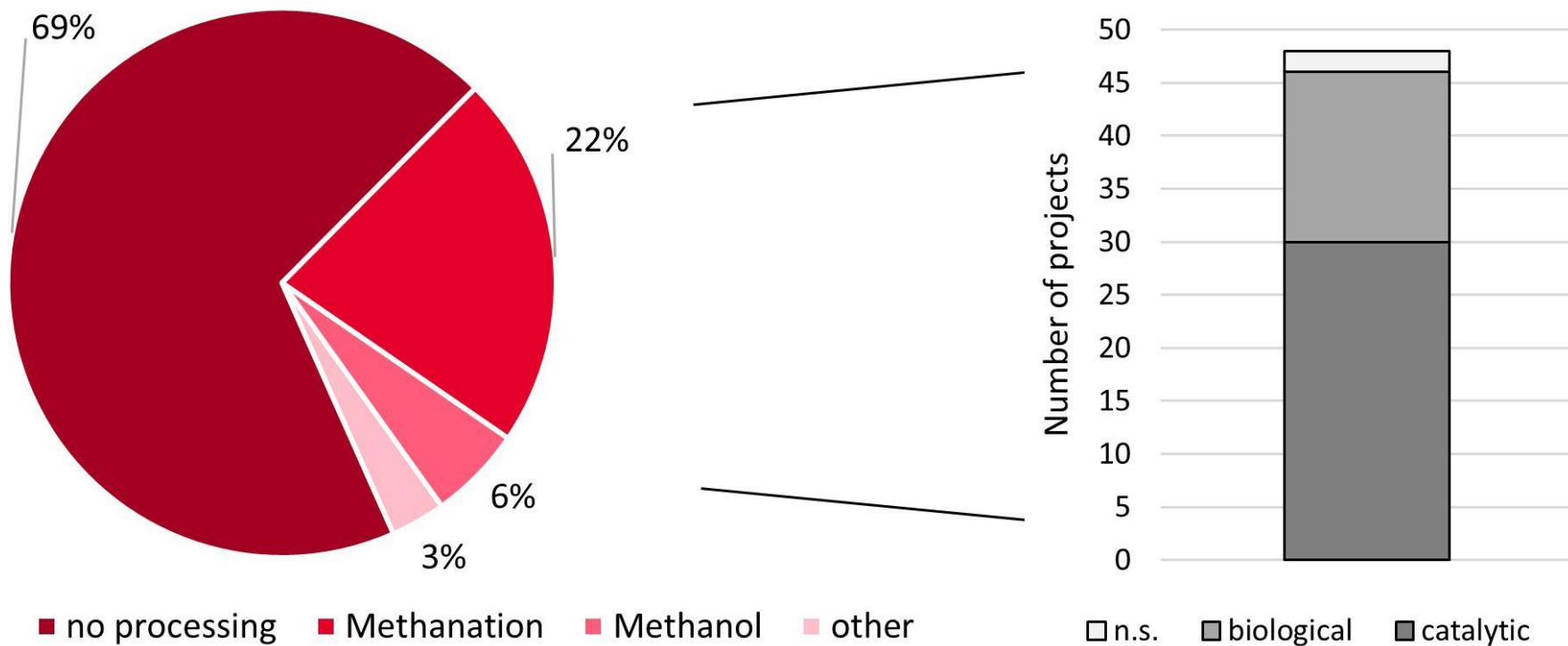


Cumulative installed capacity according to electrolyzer type. n.s., not specified; PEM, polymer electrolyte membrane; SOEC, solid oxide electrolyzer cell.



Electrolyzer types according to capacity.

- PEM, Polymer electrolyte membrane;
- SOEC, solid oxide electrolyzer cell;
- SPE, solid polymeric electrolyte.



Process steps of Power-to-X projects in Europe with a focus on methanation technologies, n.s., not specified.



**PtX** has a number of potential applications, and can be used to change electricity into:

- **Power-to-Gas (PtG):** This technology converts excess electricity into gases like hydrogen or methane. These e-fuel gases can be stored and used later to generate electricity again or even to power vehicles.
- **Power-to-Liquid (PtL):** In this case, extra electricity is used to produce liquid e-fuels such as synthetic gasoline or diesel. These fuels can be used in existing engines or machinery.
- **Power-to-Heat (PtH):** Here, the surplus electricity is turned into heat, which can be stored and then used for things like heating buildings or generating steam for industrial processes.
- **Power-to-Chemicals (PtC):** This involves using the electrical energy to facilitate chemical reactions, creating valuable products like fertilizers or other industrial chemicals.

- Η αγορά ανανεώσιμων πηγών ενέργειας αλλάζει χάρη στην πτώση των τιμών και την αυξημένη ζήτηση για καθαρότερες πηγές ενέργειας.
- Όλο και περισσότερη ηλεκτρική ενέργεια παράγεται από τον ήλιο και τον άνεμο, αλλά οι ανανεώσιμες πηγές ενέργειας εξακολουθούν να αποτελούν ένα πολύ μικρό ποσοστό.
- Η θέρμανση, οι μεταφορές και οι βιομηχανικές διαδικασίες εξακολουθούν να κυριαρχούνται από ορυκτά καύσιμα και πολλά από αυτά τα συστήματα δεν μπορούν να λειτουργούν με ηλεκτρική ενέργεια μια και χρειάζονται τα καύσιμα.
- Μία από τις νέες τεχνολογίες που αλλάζουν το παιχνίδι, το Power-to-X είναι ένας όρος που καλύπτει διαφορετικές διαδικασίες που μετατρέπουν την ηλεκτρική ενέργεια σε θερμότητα, υδρογόνο ή συνθετικά καύσιμα, πράγμα που σημαίνει ότι όλο και περισσότερο το ενεργειακό μας σύστημα μπορεί να αποχαιρετήσει στον άνθρακα, το πετρέλαιο και το φυσικό αέριο.

- Η τεχνολογία Power-to-X προσφέρει μια σημαντική ευκαιρία για να επιταχυνθεί η στροφή προς τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας αυξάνοντας την παραγωγή συνθετικών καυσίμων και μειώνοντας γρήγορα τις εκπομπές ορυκτών καυσίμων σε τομείς που κυμαίνονται από τη βιομηχανία χάλυβα και την παραγωγή τροφίμων έως τη χημική βιομηχανία και τα λιπάσματα.
- Οι τομείς στους οποίους μπορεί να διαδραματίσει βασικό ρόλο είναι πολλοί και επεκτείνονται και στην επίλυση μακροπρόθεσμων προκλήσεων αποθήκευσης ενέργειας, ρυθμίζοντας τα скаμπανεβάσματα στον εφοδιασμό από ανανεώσιμες πηγές.
- Προς το παρόν, οι ανεμογεννήτριες στη βόρεια Γερμανία, για παράδειγμα, μερικές φορές παράγουν τόσο μεγάλη ισχύ που πρέπει να αποσυνδεθούν από το δίκτυο για να αποτραπεί η υπερφόρτωση.

- Η περίσσεια ισχύος θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για τη διάσπαση του νερού σε  $O_2$  και  $H_2$ , μέσω ηλεκτρόλυσης.
- Το  $H_2$  όχι μόνο μπορεί να αποθηκευτεί και να αποθηκευτεί για λιγότερες θολές ημέρες, αλλά μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τη θέρμανση κτιρίων, την κατασκευή χάλυβα που αναφέρθηκε ή τη μεταφορά κυψελών καυσίμου για φορτηγά και πλοία.
- Τα περιβαλλοντικά οφέλη από την υιοθέτηση αυτής της τεχνολογίας είναι τεράστιας σημασίας καθώς οδηγούμαστε σε απανθρακοποίηση και ελαχιστοποιείται το ενεργειακό αποτύπωμα από χρήσεις που παραδοσιακά προκαλούν πλήθος ρύπων.
- Το  $CO_2$  που απαιτείται για την παραγωγή των καυσίμων μπορεί να φιλτραριστεί από τις εκπομπές από μονάδες παραγωγής ενέργειας από τροφοδότηση άνθρακα, τσιμέντο ή βιοαέριο, ή απευθείας από τον αέρα, δηλαδή, ακόμα καλύτερα για έναν κόσμο με ουδέτερο άνθρακα.

- Αυτή τη στιγμή, το υψηλό κόστος είναι ίσως το μεγαλύτερο εμπόδιο στο Power-to-X που καλύπτει όλο και περισσότερες ενεργειακές μας ανάγκες.
- Το μεγαλύτερο μέρος του  $H_2$  εξακολουθεί να παράγεται από αργό πετρέλαιο και φυσικό αέριο, κάτι που είναι αρκετά φθηνότερο από το να το προμηθεύεται από αιολική ενέργεια.
- Υπάρχουν όρια στην αποτελεσματικότητά του καθώς όταν ένα είδος ενέργειας μετατρέπεται σε άλλη, κάποια χάνεται πάντα στην πορεία.
- Αν ληφθεί υπόψη το κόστος που επέρχεται από την κλιματική αλλαγή ή το πώς αντιλαμβανόμασταν τις ανανεώσιμες πηγές ενέργειας πριν ορισμένο αριθμό ετών, πολύ εύκολα θα καθιερώναμε το  $H_2$  ως εναλλακτική λύση.
- Μια μαζική επέκταση των ΑΠΕ θα προσφέρει ασφάλεια για επενδύσεις σε νέες τεχνολογίες όπως η Power-to-X και θα μας επιτρέψει να αποκομίστούμε τα πλεονεκτήματά τους. 29

- Το Power-to-X είναι μια σειρά μεθόδων μετατροπής ηλεκτρικής ενέργειας, αποθήκευσης ενέργειας και αναμετατροπής που χρησιμοποιούν το πλεόνασμα ηλεκτρικής ενέργειας, συνήθως σε περιόδους όπου η κυμαινόμενη παραγωγή ανανεώσιμης ενέργειας υπερβαίνει το φορτίο.
- Οι τεχνολογίες Power-to-X (PtX) θεωρούνται καλός τρόπος για τη μείωση των εκπομπών αερίων θερμοκηπίου, διότι το δυναμικό αποθήκευσης ενέργειας θα μπορούσε να εξισορροπήσει το ηλεκτρικό δίκτυο που απαιτείται για την περαιτέρω ανάπτυξη των ανανεώσιμων πηγών ενέργειας. Ωστόσο, οι γερμανικές περιβαλλοντικές ομάδες BUND και Öko-Institut επικρίνουν αυτή την τεχνολογία.

- Τεχνητά παραγόμενα αέρια, υγρά και χημικές ουσίες που αποθηκεύουν ενέργεια -οι αποκαλούμενες τεχνολογίες Power-to-X (PtX)- συχνά αναφέρονται ως το κλειδί για τη μετάβαση στην ενέργεια.
- Η γερμανική περιβαλλοντική ΜΚΟ BUND και το ερευνητικό ίδρυμα Öko-Institut σημειώνει ότι οι τεχνολογίες PtX δεν είναι κατ' ανάγκην πιο φιλικές προς το περιβάλλον από την εξόρυξη άνθρακα (29/6/23).
- Εάν η ηλεκτρική ενέργεια που απαιτείται για την τροφοδοσία της ενεργειακής διαδικασίας PtX δεν χρησιμοποιεί πλήρως τις ΑΠΕ, οι εκπομπές CO<sub>2</sub> θα είναι υψηλές.
- Το αποτύπωμα άνθρακα των τεχνολογιών PtX «θα μπορούσε να είναι πολύ χειρότερο από ό, τι με τα ορυκτά καύσιμα όπως το φυσικό αέριο ή το ντίζελ» (Ernst-Christoph Stolper, πρόεδρος BUND).

- Η πηγή ενέργειας είναι απαραίτητη όταν πρόκειται για PtX, επειδή η διαδικασία είναι τόσο εντατική από άποψη ενέργειας καθώς βασίζεται σε τεχνητά παραγόμενο  $H_2$ .
- Η διαδικασία PtX μπορεί να πραγματοποιηθεί με αναμόρφωση του ατμού, η οποία βασίζεται στο φυσικό αέριο και απελευθερώνει πολύ  $CO_2$ .
- Η διαδικασία μπορεί επίσης να πραγματοποιηθεί μέσω ηλεκτρόλυσης, η οποία, παρά το γεγονός ότι δεν περιέχει εκπομπές, απαιτεί ακόμα πολλή ηλεκτρική ενέργεια.
- Οι ουσίες PtX πρέπει να παράγονται μόνο με ανανεώσιμες πηγές ενέργειας
- Αν βασιστούμε στο PtX ως πηγή ενέργειας στα μελλοντικά δίκτυα ηλεκτρικής ενέργειας, πρέπει να διασφαλιστεί ότι θα αξιοποιούνται ΑΠΕ, σύμφωνα με τους συντάκτες του εγγράφου.



- Πρέπει επίσης να αποσαφηνιστεί η προέλευση του απαιτούμενου CO<sub>2</sub>. Μόνο σε συνδυασμό με το CO<sub>2</sub> μπορεί να μεταποιηθεί το υδρογόνο σε ευρέως χρησιμοποιούμενο μεθάνιο ή ηλεκτρονικά καύσιμα.
- Εάν το CO<sub>2</sub> δεν εξάγεται από άνθρακα, πετρέλαιο ή φυσικό αέριο, οι εναλλακτικές λύσεις είναι περιορισμένες.
- Το ξύλο είναι μια από τις πρωταρχικές πηγές, αλλά η καλλιέργειά του απαιτεί μεγάλες εκτάσεις. Το έγγραφο κατέληξε στο συμπέρασμα ότι είναι απαραίτητο να διασφαλιστεί ότι χρησιμοποιούνται μόνο βιώσιμα βιοϋλικά.
- Με άλλα λόγια, το CO<sub>2</sub> μπορεί να αποκοπεί από τον αέρα, αλλά η τεχνολογία δεν έχει ακόμη ωριμάσει επαρκώς.
- «Η τεχνολογία θα είναι διαθέσιμη στην πράξη μόνο μεσοπρόθεσμα και ως μια συγκριτικά δαπανηρή επιλογή»

[Florence Schulz](#) , [EurActiv.de](#),

Μετάφραση [Σοφία Ελανίδου](#), 31 Ιουλ 2019

# Systematic effects of flexible power-to-X operation in a renewable energy system: a case study from Japan

- For achieving a carbon-neutral energy system, economical flexibility mechanisms are crucial to accommodate intermittent and decentralized renewable energy sources.
- Power-to-X (P2X) is a promising technology for this purpose.
- This study aims to elucidate the systematic effects and competition of dynamically operated power-to-X (P2X) technologies as a flexibility option in comprehensive renewable energy systems.
- They developed a linear programming model to optimize energy systems incorporating P2X technologies, including water electrolysis, methanation, Fischer–Tropsch synthesis, and Haber–Bosch synthesis, and investigated the impact of P2X flexibility on the system structure and energy costs, focusing on Japan as a case study.
- The results demonstrate that each P2X technology effectively shifts electricity loads and reduces curtailment by more than 80%.
- The contribution of each P2X technology varies, with water electrolysis playing a dominant role due to its relatively low fixed costs and large scale.
- P2X has a cost advantage over these flexibility options.
- The results also highlight that the maximum effect is achieved when the capacity factor of P2X is 30%.
- Synthetic hydrocarbons would require a carbon price of over 356 €/tCO<sub>2</sub> to compete with fossil fuels.
- Domestic electrofuels would face tough competition with global fuel costs.
- The reduction in electricity costs through P2X, along with its contribution to energy security, may incentivize its adoption.

# Systematic effects of flexible Power-to-X operation

## Power-to-X technologies

Water electrolysis  
Methanation

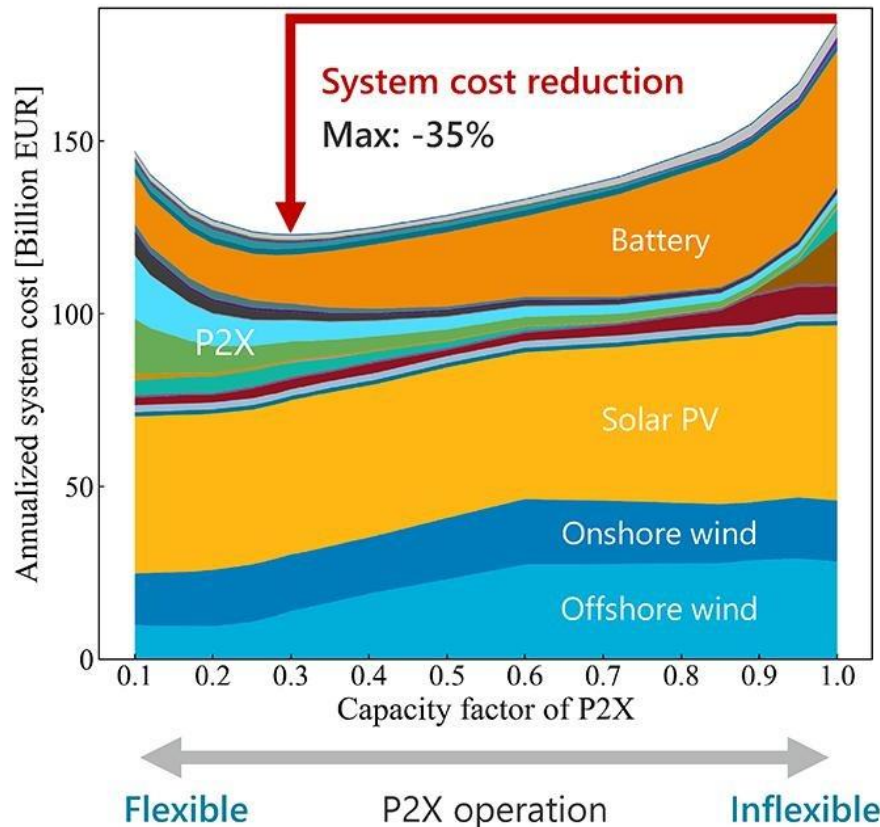
Fischer-Tropsch synthesis  
Haber-Bosch synthesis

VS

## Other flexibility options

Stationary battery  
Dispatchable generation

Transmission  
Curtailment

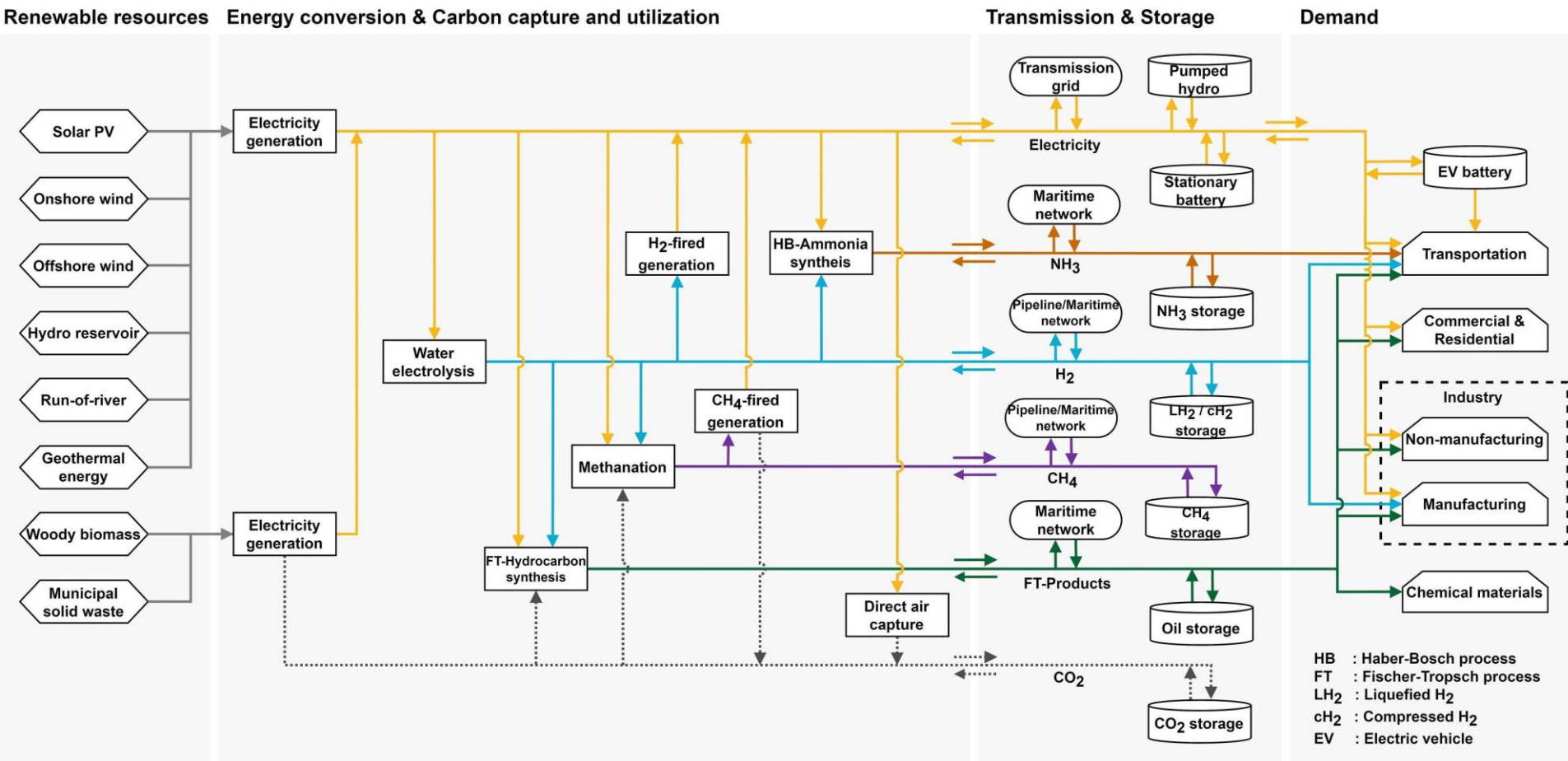


- **Curtailment** : - 82%
- **Electricity supply cost** : - 41%
- **Hydrogen supply cost** : - 30%

\*Supply costs include storage and transport costs.

## Renewable energy system components

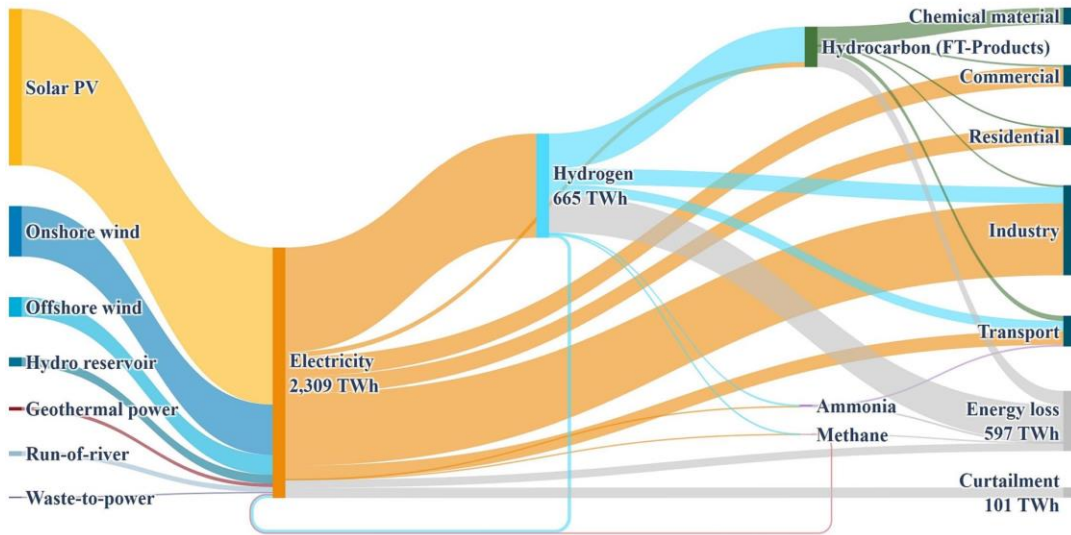
|                              |                           |
|------------------------------|---------------------------|
| Pipeline                     | PSCC                      |
| Maritime                     | Electrolysis              |
| Grid expansion               | FT synthesis              |
| CH <sub>4</sub> storage      | NH <sub>3</sub> synthesis |
| NH <sub>3</sub> storage      | Methanation               |
| Oil storage                  | CH <sub>4</sub> -fired    |
| LH <sub>2</sub> storage      | H <sub>2</sub> -fired     |
| CO <sub>2</sub> storage      | Woody biomass             |
| cH <sub>2</sub> storage      | Waste-to-power            |
| Pumped hydro                 | Geothermal power          |
| Battery                      | Run-of-river              |
| CH <sub>4</sub> liquefaction | Hydro reservoir           |
| H <sub>2</sub> compression   | Solar PV                  |
| H <sub>2</sub> liquefaction  | Onshore wind              |
| DAC                          | Offshore wind             |



System configuration covered by our model. Hydrogen has three states: low pressure, compressed, and liquefied. Methane has two states: low pressure and liquefied.

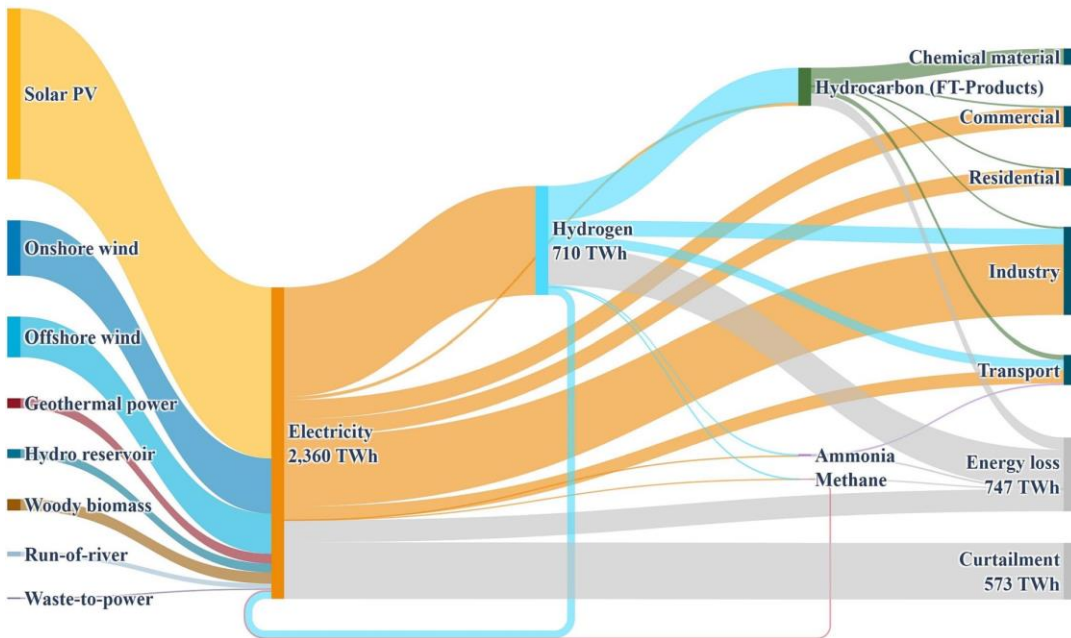
TPES: 2,442 TWh (8,791 PJ)  
FEC: 1,738 TWh (6,257 PJ)

FLEX



TPES: 3,064 TWh (11,031 PJ)  
FEC: 1,738 TWh (6,257 PJ)

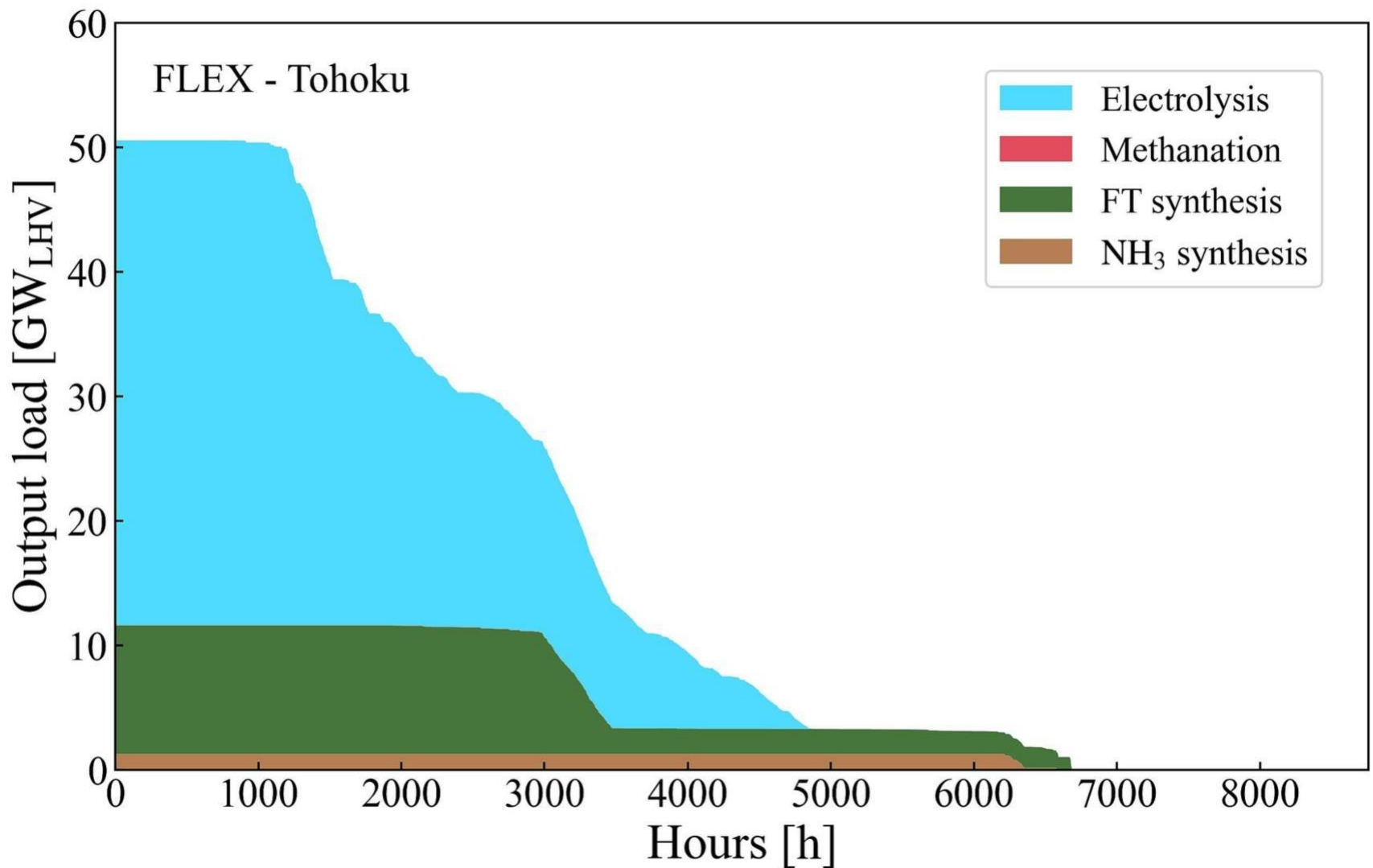
FIX\_CF100%



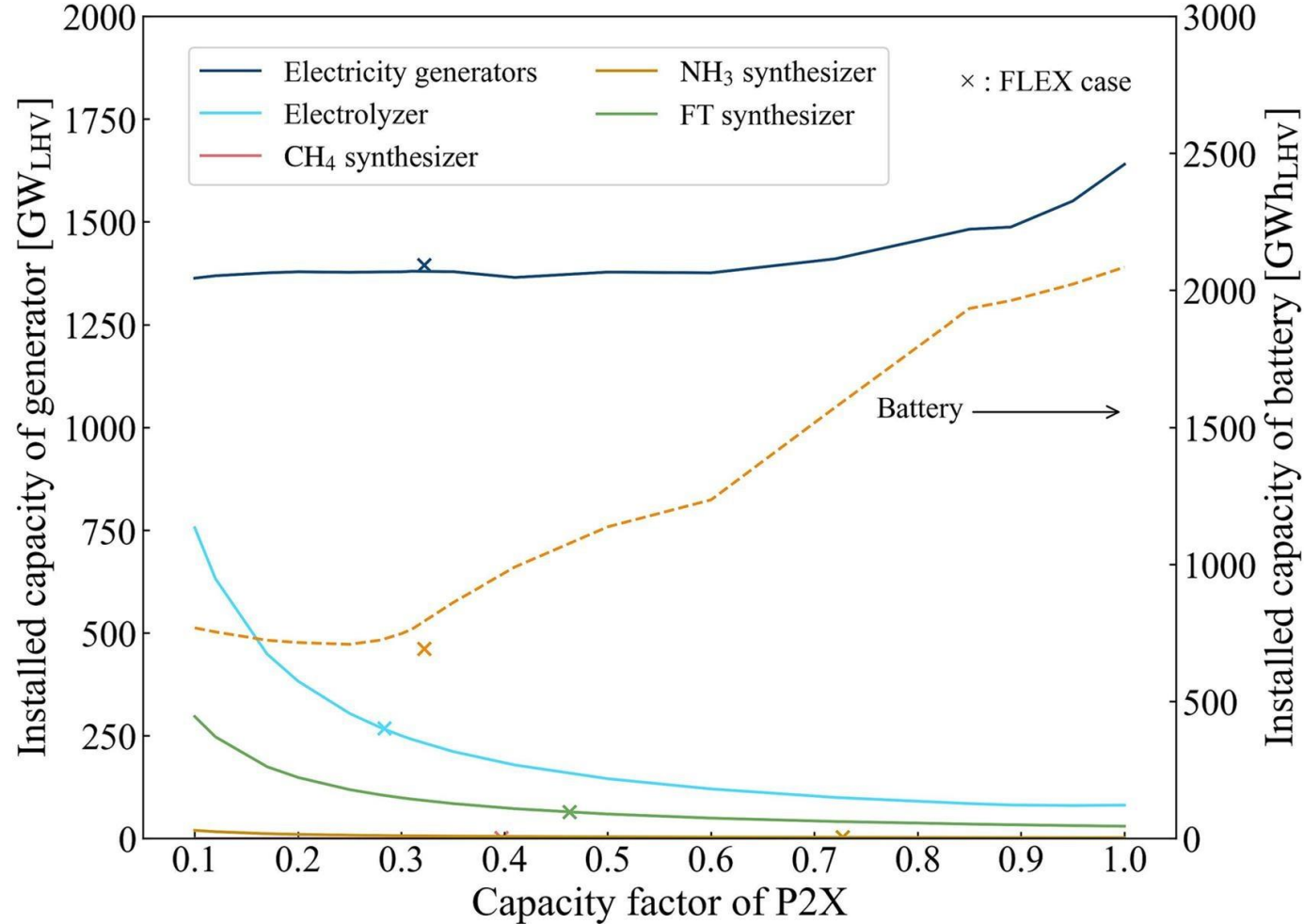
Energy flow diagrams for the FLEX (top) and FIX\_CF100% (bottom) cases, respectively with and without flexibility of P2X. The diagrams show the qualitative annual energy flow from energy resources (left) to the end users (right). The total primary energy supply (TPES), final energy consumption (FEC), and other values are given as lower [heating values](#).

The [energy loss](#) consists of the conversion loss, charging loss, transmission loss and energy consumption for fuel liquefaction and compression. The conversion loss in hydrocarbon synthesis includes energy consumed for carbon capture.

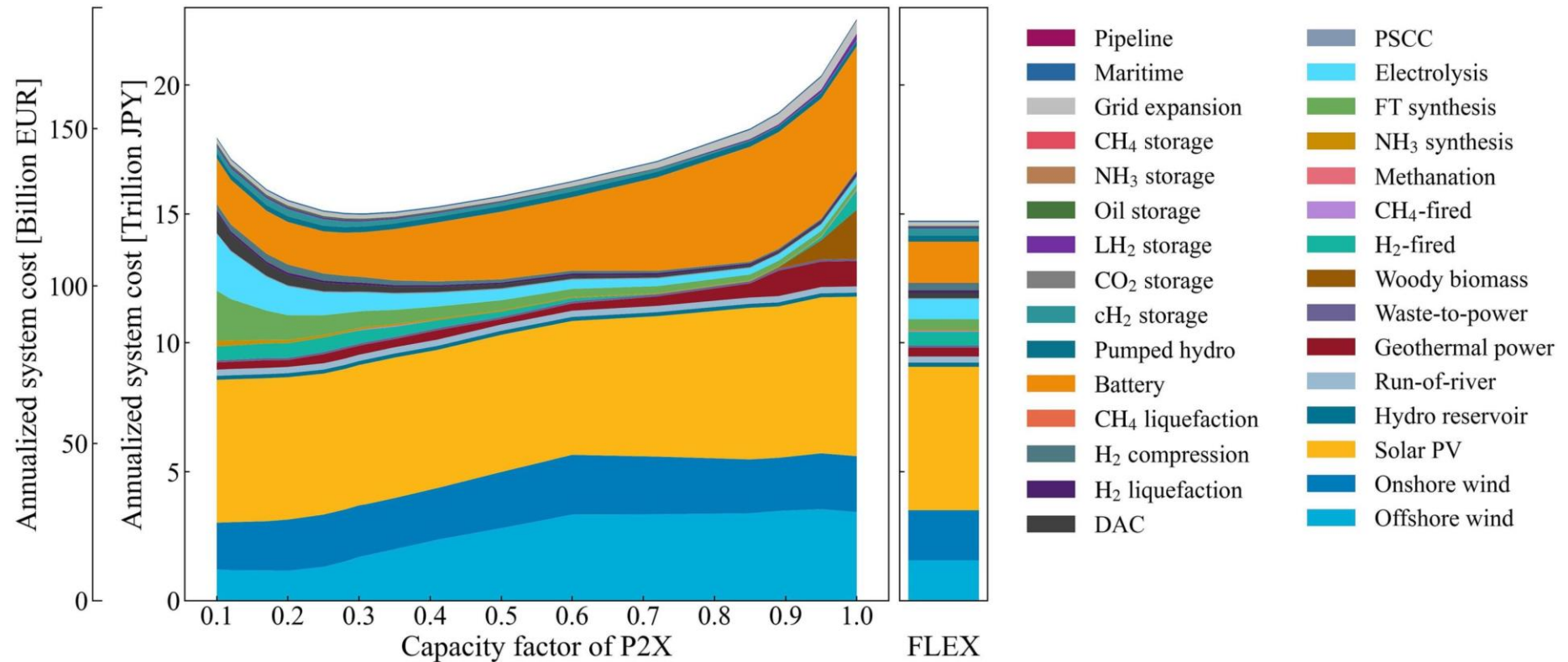




Cumulative [load duration curve](#) of P2X technology in Tohoku area for FLEX case. The load is hourly fuel outputs based on LHV.

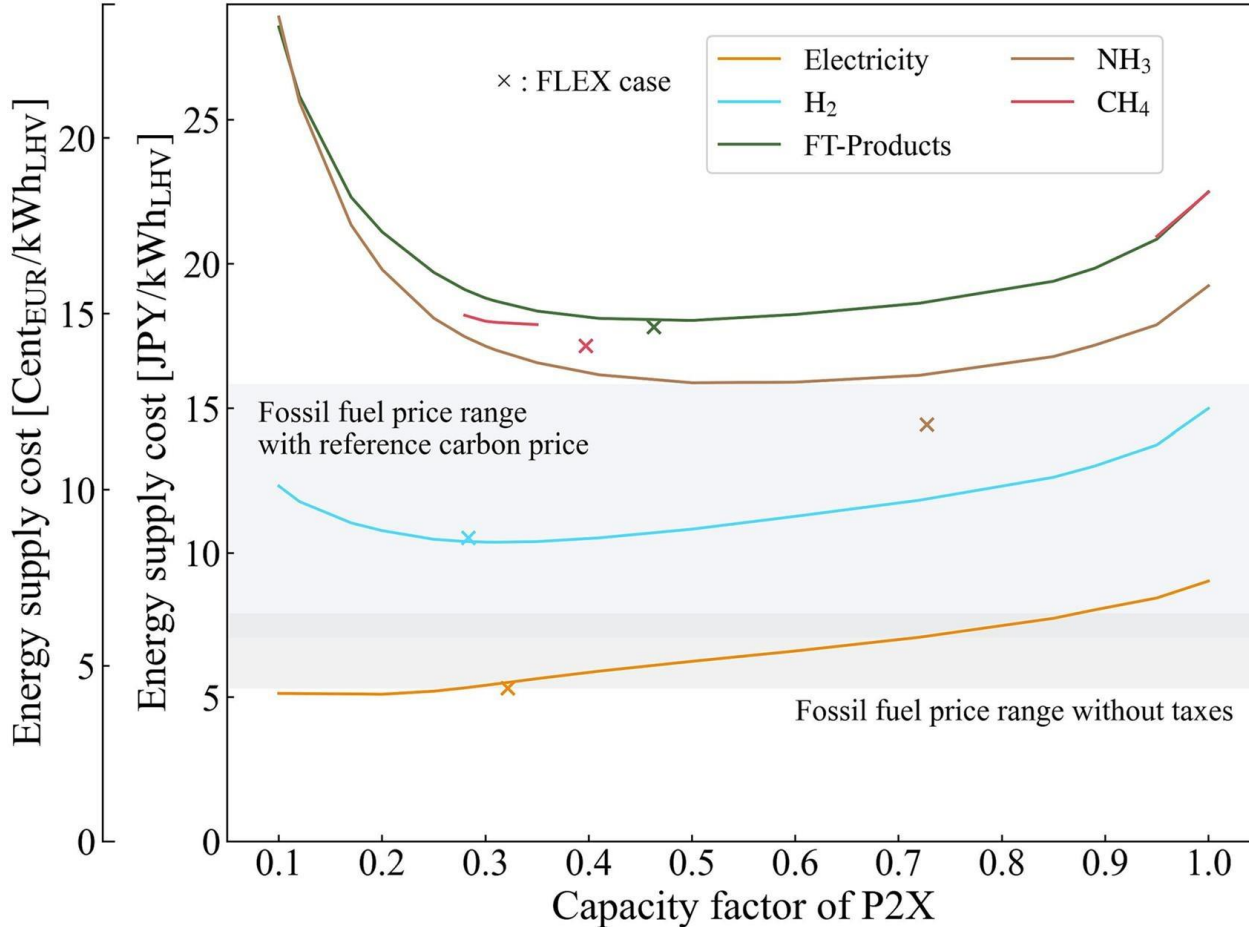


Total installed capacity of the generating and storage technologies in all cases. The left vertical axis represents the scale of electricity generators and P2X plants. The right vertical axis depicts the scale of the storage batteries. “Electricity generators” represents all generation technologies. Capacity of a P2X plant is defined as the maximum fuel output. The capacity factor of P2X for electricity generators and [battery](#) in the FLEX case are set at 0.32, which is the weighted average capacity factor for each P2X component.

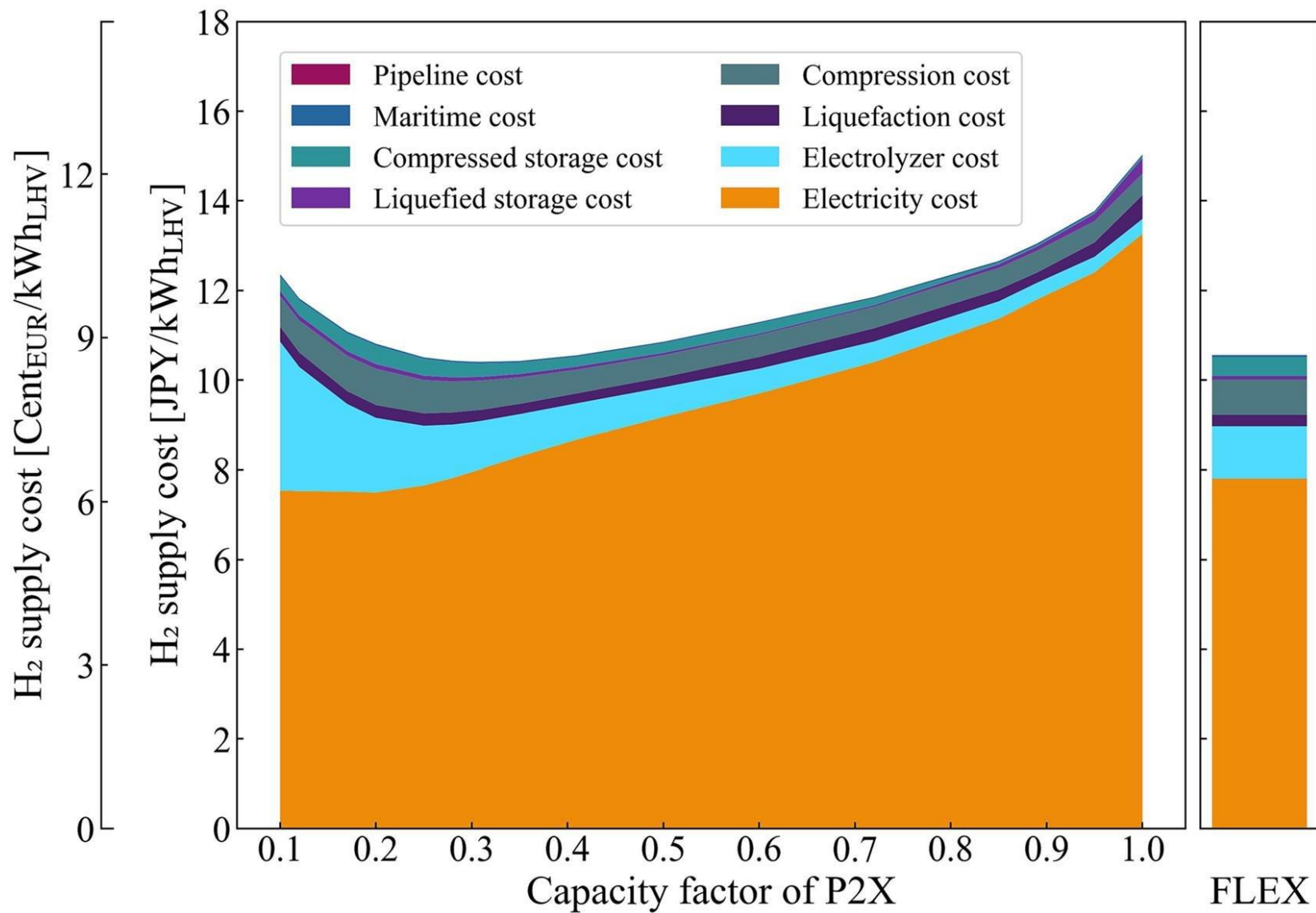


Sensitivity of system cost to capacity factor of P2X for the FLEX case. The system costs consist of annualized capital investment, FOM and fuel cost. Currency converted assuming 1 EUR = 122 JPY (Average TTM in 2019).





Supply costs of electricity and [electrofuels](#), including fixed, storage, transport, and CO<sub>2</sub> capture costs. The unit of energy is based on LHV. The capacity factor of P2X for electricity in FLEX case are set at 0.32, which is the weighted average capacity factor for each P2X component. Fossil fuel prices excluding taxes range from 4.3 cent<sub>EUR</sub>/kWh (industrial natural gas) to 6.5 cent<sub>EUR</sub>/kWh (regular gasoline). Reference carbon prices are in the 84–280 EUR/tCO<sub>2</sub> quartile range, which translates to 1.5 cent<sub>EUR</sub>/kWh for LNG to 6.6 cent<sub>EUR</sub>/kWh for gasoline. The range of this added to the fossil fuel price without taxes is 5.8–13.0 cent<sub>EUR</sub>/kWh.



Breakdown of H<sub>2</sub> supply costs for all cases. Liquefaction and compression costs include its endogenous electricity costs.

# References

- Onodera, H; Delage, R; Nakata, T. (2023). Systematic effects of flexible power-to-X operation in a renewable energy system: a case study from Japan. *Energy Conversion and Management: X*, **20**: 100416.  
doi:10.1016/j.ecmx.2023.100416
- M. Götz, J. Lefebvre, F. Mörs, A. McDaniel Koch, F. Graf, S. Bajohr, *et al.* Renewable Power-to-Gas: a technological and economic review. *Renew Energy*, **85** (2016), pp. 1371-1390, [10.1016/J.RENENE.2015.07.066](https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2015.07.066)
- V. Dieterich, A. Buttler, A. Hanel, H. Spliethoff, S. Fendt. Power-to-liquid via synthesis of methanol, DME or Fischer-Tropsch-fuels: a review. *Energy Environ Sci*, **13** (2020), 3207, [10.1039/d0ee01187h](https://doi.org/10.1039/d0ee01187h)
- M.J. Palys, P. Daoutidis. Power-to-X: a review and perspective. *Comput Chem Eng*, **165** (2022), 107948, [10.1016/J.COMPCHEMENG.2022.107948](https://doi.org/10.1016/J.COMPCHEMENG.2022.107948)
- I. Sorrenti, T.B. Harild Rasmussen, S. You, Q. Wu. The role of power-to-X in hybrid renewable energy systems: a comprehensive review. *Renew Sustain Energy Rev*, **165** (2022), Article 112380, [10.1016/J.RSER.2022.112380](https://doi.org/10.1016/J.RSER.2022.112380)

- Ahmed Rufai Dahiru, Ari Vuokila, Mika Huuhtanen, Recent development in Power-to-X: Part I - A review on techno-economic analysis, *Journal of Energy Storage*, **56**, Part A, 2022, 105861, 10.1016/j.est.2022.105861
- Sternberg, André; Bardow, André (2015). Power-to-What — Environmental assessment of energy storage systems. *Energy and Environmental Science*. **8**(2): 389–400. doi:10.1039/c4ee03051f
- Foit, Severin; Eichel, Rüdiger-A; Vinke, Izaak C; de Haart, Lambertus GJ (2016). Power-to-Syngas – an enabling technology for the transition of the energy system? Production of tailored synfuels and chemicals using renewably generated electricity. *Angewandte Chemie International Edition*. **56**(20): 5402–5411. doi:10.1002/anie.201607552
- Zakeri, Behnam; Rinne, Samuli; Syri, Sanna (31 March 2015). Wind integration into energy systems with a high share of nuclear power – what are the compromises?. *Energies*. **8**(4): 2493–2527. doi:10.3390/en8042493
- Power-to-X: entering the energy transition with Kopernikus. Aachen, Germany: RWTH Aachen. 5/4/2016, <https://www.rwth-aachen.de/go/id/kvyv?lidx=1> (access 17/12/23).

- M. Götz, J. Lefebvre, F. Mörs, A. McDaniel Koch, F. Graf, S. Bajohr, *et al.* Renewable Power-to-Gas: a technological and economic review. *Renew Energy*, **85** (2016), pp. 1371-1390, [10.1016/J.RENENE.2015.07.066](https://doi.org/10.1016/J.RENENE.2015.07.066)
- V. Dieterich, A. Buttler, A. Hanel, H. Spliethoff, S. Fendt. Power-to-liquid via synthesis of methanol, DME or Fischer-Tropsch-fuels: a review. *Energy Environ Sci*, **13** (2020), 3207, [10.1039/d0ee01187h](https://doi.org/10.1039/d0ee01187h)
- M.J. Palys, P. Daoutidis. Power-to-X: a review and perspective. *Comput Chem Eng*, **165** (2022), 107948, [10.1016/J.COMPCHEMENG.2022.107948](https://doi.org/10.1016/J.COMPCHEMENG.2022.107948)
- I. Sorrenti, T.B. Harild Rasmussen, S. You, Q. Wu. The role of power-to-X in hybrid renewable energy systems: a comprehensive review. *Renew Sustain Energy Rev*, **165** (2022), Article 112380, [10.1016/J.RSER.2022.112380](https://doi.org/10.1016/J.RSER.2022.112380)
- Z. Chehade, C. Mansilla, P. Lucchese, S. Hilliard, J. Proost. Review and analysis of demonstration projects on power-to-X pathways in the world. *Int J Hydrogen Energy*, **44** (2019), 27637-27655, [10.1016/J.IJHYDENE.2019.08.260](https://doi.org/10.1016/J.IJHYDENE.2019.08.260)

- Lund, Peter D; Lindgren, Juuso; Mikkola, Jani; Salpakari, Jyri (2015). Review of energy system flexibility measures to enable high levels of variable renewable electricity. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. **45**: 785–807. doi:10.1016/j.rser.2015.01.057.
- Sillman, J.; Uusitalo, V.; Ruuskanen, V.; Ojala, L.; Kahiluoto, H.; Soukka, R.; Ahola, J. (2020). A life cycle environmental sustainability analysis of microbial protein production via power-to-food approaches. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. **25** (11): 2190–2203. doi:10.1007/s11367-020-01771-3.
- B.R. de Vasconcelos, J.M. Lavoie. Recent advances in power-to-X technology for the production of fuels and chemicals. *Front. Chem.*, **7** (2019), 1-24, 10.3389/fchem.2019.00392
- Z. Chehade, C. Mansilla, P. Lucchese, S. Hilliard, J. Proost. Review and analysis of demonstration projects on power-to-X pathways in the world. *Int J Hydrogen Energy*, **44** (2019), 27637-27655, 10.1016/J.IJHYDENE.2019.08.260

- J. Gorre, F. Ruoss, H. Karjunen, J. Schaffert, T. Tynjälä. Cost benefits of optimizing hydrogen storage and methanation capacities for Power-to-Gas plants in dynamic operation. *Appl Energy*, **257** (2020), Article 113967, 10.1016/J.APENERGY.2019.113967
- T. Burandt. Analyzing the necessity of hydrogen imports for net-zero emission scenarios in Japan. *Appl Energy*, **298** (2021), Article 117265, 10.1016/J.APENERGY.2021.117265
- M. Fasihi, R. Weiss, J. Savolainen, C. Breyer. Global potential of green ammonia based on hybrid PV-wind power plants. *Appl Energy*, **294** (2021), 116170, 10.1016/J.APENERGY.2020.116170
- K. Verleysen, A. Parente, F. Contino. How sensitive is a dynamic ammonia synthesis process? Global sensitivity analysis of a dynamic Haber-Bosch process (for flexible seasonal energy storage). *Energy*, **232** (2021), Article 121016, 10.1016/J.ENERGY.2021.121016
- Wulf Christina, Zapp Petra, Schreiber Andrea. Review of Power-to-X Demonstration Projects in Europe. *Frontiers in Energy Research* **8** 2020 <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenrg.2020.00191> DOI=10.3389/fenrg.2020.00191